

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DARCI LUIZ TOMASI JUNIOR

MODELO DE CALIBRAÇÃO PARA SISTEMAS DE ODOMETRIA ROBÓTICA

CURITIBA PR

2016

DARCI LUIZ TOMASI JUNIOR

MODELO DE CALIBRAÇÃO PARA SISTEMAS DE ODOMETRIA ROBÓTICA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Informática no Programa de Pós-Graduação em Informática, setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Ciência da Computação*.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Todt.

CURITIBA PR

2016

Tomasi Junior, Darci Luiz
Modelo de calibração para sistemas de odometria robótica / Darci
Luiz Tomasi Junior. – Curitiba, 2016
49 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Informática.
Orientadora: Eduardo Todt
Bibliografia: p. 39

1. Robótica. 2. Calibração. I. Todt, Eduardo. II. Título

CDD 006.3

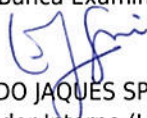
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **DARCI LUIZ TOMASI JUNIOR**, intitulada: "**Modelo de calibração para sistemas de odometria robótica**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

Curitiba, 30 de Novembro de 2016.



EDUARDO TODT
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



EDUARDO JAQUES SPINOSA
Avaliador Interno (UFPR)



NEUSA GRANDÓ
Avaliador Externo (UTP)



*Aos meus amigos pelo apoio,
A minha esposa pela compreensão,
E aos meus pais por tudo.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me suprir de força e dedicação para a conclusão desta pesquisa.

Agradeço a minha mãe, Nelci, e ao meu pai, Darci, que me servem de referência em todos os dias da minha vida. Que um dia eu possa ser um pai aos meus filhos, assim como vocês são para mim.

Agradeço a minha esposa, Bel, pela liberdade, compreensão, confiança e companheirismo depositado em mim durante o período do mestrado, assim como, em todos os dias das nossas vidas.

Agradeço a empresa JTEKT Automotiva Brasil pela disponibilidade de espaço físico, para a elaboração dos ensaios realizados neste estudo, assim como, pela flexibilidade do horário de trabalho a mim concedido. Aos meus colegas, Everson Luiz Coradin Gulin, Edson Neves de Melo, Rodrigo Joel Torquato de Lima, André Luciano de Oliveira Ruthes, Henrique Seiti Inoue e Amadeu Veiga, por toda a ajuda fornecida.

Um agradecimento especial ao meu orientador Eduardo Todt pelo esforço, apoio e dedicação em mim depositada, durante esta importante etapa da minha vida

Agradeço ao professor Eduardo Spinosa por todos os erros apontados, pelas críticas bem observadas e por todos os elogios concedidos.

Agradeço a professora Neusa Grando pela amizade, pelo tempo dedicado a leitura e correção desta dissertação, mas principalmente por me ajudar em meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço por fim a todas as pessoas que contribuíram, direta o indiretamente nesta importante etapa da minha vida.

"Estava Jesus em certo lugar orando e, quando acabou, disse-lhe um dos seus discípulos: Senhor, ensina-nos a orar, como também João ensinou aos seus discípulos. Ao que ele lhes disse: Quando orardes, dizei: Pai, santificado seja o teu nome; venha o teu reino; dá-nos cada dia o nosso pão cotidiano; e perdoa-nos os nossos pecados, pois também nós perdoamos a todo aquele que nos deve; e não nos deixes entrar em tentação, mas livra-nos do mal."

(Bíblia Sagrada, Lucas, 11, 1–4)

Resumo

Para realizar a navegação de uma base robótica em um ambiente desconhecido, alguns mecanismos para detectar o posicionamento e a localização devem ser fornecidos a base. Quando a base está em processo de navegação e faz uso desses mecanismos, erros provenientes do ambiente e da base robótica são inseridos no sistema, resultando em um posicionamento errôneo. Uma forma de reduzir a amplitude dos erros é através de um modelo de calibração eficiente, capaz de identificar e estimar valores aceitáveis para as principais fontes de incerteza nos cálculos de odometria. Este trabalho de pesquisa apresenta um novo modelo de calibração comparável aos métodos clássicos conhecidos, mas que diferencia-se pela forma com que a calibração é realizada, sendo essa a principal limitação para conseguir incrementar os resultados com o método proposto. Ao fim do procedimento padrão proposto ser realizado, os resultados são equivalentes aos dos métodos clássicos conhecidos.

Palavras-chave: UMBmark, Odometria, Calibração.

Abstract

In order to navigate a robotic base in an unfamiliar environment, some mechanism to detect positioning and location must be provided. When the robot is in the process of navigation and makes use of this mechanism, errors from the environment and the robotic base are inserted into the system, resulting in an erroneous positioning. One way to reduce the error amplitude is through an efficient calibration model, capable of identifying and estimating acceptable values for the main sources of uncertainty in odometry calculations. This work presents a new calibration model comparable to the classical methods known, but it is distinguished by the way in which the calibration is performed, being this the main limitation to be able to increase the results with the proposed method. At the end of the proposed standard procedure, the results are equivalent to those of the known classical methods.

Keywords: UMBmark, Odometry, Calibration.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Robótica móvel	1
1.1.1	Posição atual	2
1.1.2	Sensores	2
1.2	Odometria e calibração da odometria	3
1.3	Objetivo geral	4
1.4	Objetivos específicos	4
1.5	Metodologia	4
1.6	Considerações	5
2	Fundamentação teórica	7
2.1	O procedimento de verificação <i>UMBmark</i>	7
2.1.1	Erro tipo <i>A</i>	8
2.1.2	Erro tipo <i>B</i>	9
2.2	O procedimento de calibração <i>UMBmark</i>	10
2.2.1	Erro tipo <i>A</i>	10
2.2.2	Erro tipo <i>B</i>	11
2.3	O procedimento de calibração com erros adjuntos	12
2.3.1	Erro tipo <i>A</i>	12
2.3.2	Erro tipo <i>B</i>	13
2.4	Aplicando a correção ao sistema	13
2.5	Considerações	14
3	Plataforma experimental	15
3.1	Projeto mecânico e eletrônico	15
3.2	Estratégias de controle	17
3.3	Validação da base robótica	19
3.3.1	Velocidade dos motores	19
3.3.2	Deslocamento linear	20
3.3.3	Resultados dos ensaios propostos	20
3.4	Discussão	21
3.5	Considerações	22
4	Procedimento de calibração	23
4.1	Características do deslocamento rotacional	23
4.2	Procedimento de calibração rotacional	26
4.3	Discussão	29
4.4	Considerações	30

5	Experimentos e resultados	31
5.1	Comparação entre os métodos	31
5.2	Discussão	34
5.3	Considerações	35
6	Conclusão	37
	Referências Bibliográficas	39
A	Dedução da odometria robótica	41
B	Características mecânicas da base desenvolvida	45
C	Cálculos mecânicos de uma base modelo <i>direção diferencial</i>	47
C.1	Movimentos lineares	47
C.1.1	Graus por pulsos	47
C.1.2	Relação entre polias	47
C.1.3	Graus por pulsos corrigido	47
C.1.4	Pulsos por revolução corrigido	48
C.1.5	Deslocamento em uma volta da roda	48
C.1.6	Deslocamento por pulso do encoder	48
C.2	Movimentos rotacionais	48
C.2.1	Perímetro da base	48
C.2.2	Deslocamento rotacional por pulso do encoder	49

Lista de Figuras

1.1	Base robótica disposta sobre um sistema de coordenadas cartesianas [Siegwart and Nourbakhsh, 2004]. X_r , Y_r e θ formam a tripla do posicionamento final da base.	2
1.2	Sinais de saída A e B para um encoder incremental [Braga, 2009]. Com a defasagem de 90° entre as curvas, é possível identificar o sentido de giro do encoder.	3
2.1	Referenciamento da base robótica. Um ponto plano e alinhado com as rodas deve ser o ponto de referenciamento.	7
2.2	Apresentação dos dados adquiridos durante o processo de calibração. [Borenstein and Feng, 1995]. O centro de gravidade é a média de todos os pontos adquiridos para o sentido horário e anti-horário de giro.	9
2.3	Erro característico tipo A. Valor da constante $Dbaseline$ não representa o valor real apresentado na base robótica.	9
2.4	Erro característico tipo B. Os diâmetros individuais de cada uma das rodas não representam o valor real apresentado na base. Neste exemplo a roda direita é menor que a roda esquerda.	10
2.5	Representação do componente α no erro tipo A [Borenstein and Feng, 1995]. .	11
2.6	Relações geométricas de deslocamento [Borenstein and Feng, 1995]. R é o raio de curvatura apresentado durante o deslocamento, devido ao erro tipo B.	11
3.1	Vista frontal de um modelo direção diferencial, onde o ângulo de 90° entre as rodas e a superfície de apoio deve ser observado fisicamente na base.	15
3.2	Vista superior de um modelo direção diferencial. Neste ponto de vista os motores devem estar alinhados, formando um ângulo de 180° entre os pontos de fixação. .	16
3.3	Placa Arduino Mega2560 [Arduino, 2016].	17
3.4	Projeto eletrônico completo da base desenvolvida.	17
3.5	Controlador PID completo em malha fechada [Instruments, 2016]. Neste modelo cada motor é controlado individualmente, observando somente o encoder de referência acoplado ao motor.	18
3.6	Malha de controle da base com adição do controlador <i>cross-coupling</i> . Neste modelo a correção é feita observando os pulsos dos dois encoders.	19
3.7	Resultado para o ensaio <i>velocidade dos motores</i> com os controles malha aberta, malha fechada e <i>cross-coupling</i> . O único modelo que controla o erro é o <i>cross-coupling</i>	20
3.8	Resultado para o ensaio <i>deslocamento linear</i> com os controles malha aberta, malha fechada e <i>cross-coupling</i> . O modelo <i>cross-coupling</i> é o que melhor posiciona a base no fim do ensaio.	21

4.1	Curva característica de deslocamento rotacional de 180°	24
4.2	Curva característica de deslocamento rotacional - Sentido horário de giro. . . .	25
4.3	Curva característica de deslocamento rotacional - Sentido anti-horário de giro. .	26
4.4	Referenciamento da base - Visão geral.	27
4.5	Referenciamento da base - Detalhe do posicionamento.	27
4.6	Comportamento da base durante o procedimento de calibração do <i>Baseline</i> . Os deslocamentos em relação aos eixos <i>X</i> e <i>Y</i> são utilizados para determinar o ângulo θ de parada.	28
4.7	Comportamento da base durante a calibração do <i>WheelRate</i> . O deslocamento em relação ao eixo <i>Y</i> é o utilizado para a correção.	29
5.1	Comparação de centros de gravidade para o ensaio <i>UMBmark</i> . Com o aumento do número de calibrações o centro de gravidade diminui.	31
5.2	Comparação de distâncias <i>euclidiana</i> para o ensaio <i>UMBmark</i> . Com o aumento de número de calibrações, o erro de posicionamento final da base diminui. . . .	32
5.3	Comparação entre centros de gravidade para erros adjuntos. Assim como no modelo <i>UMBmark</i> o centro de gravidade diminui, mas aqui de forma mais rápida como observado já na primeira calibração.	33
5.4	Comparação entre distâncias <i>euclidiana</i> para o método dos erros adjuntos. Novamente a diminuição do erro de posicionamento da base, mas com ganho mais elevado já na primeira calibração.	33
5.5	Comparação entre centros de gravidade para calibração rotacional. Neste modelo também é observado a redução do centro de gravidade, mas com pouca diferença entre as calibrações.	34
5.6	Comparação entre distâncias <i>euclidiana</i> para o método rotacional. A distância diminui pouco quando comparado as diferentes calibrações.	34
A.1	Deslocamento de uma base robótica em trajetória circular	42
C.1	Representação do deslocamento em uma volta da roda. Adaptado de [Robótica, 2016].	48
C.2	Representação do deslocamento por pulso do encoder. Adaptado de [Robótica, 2016].	49
C.3	Representação do perímetro da base. Adaptado de [Robótica, 2016].	49

Lista de Tabelas

3.1	Características da placa Arduino Mega2560	16
4.1	Diâmetros utilizados para as rodas	24
5.1	Resultados da calibração para cada método utilizado	35
A.1	Resumo das equações de odometria.	43
B.1	Características construtivas da base robótica	46

Lista de Acrônimos

PPR	Pulsos por revolução
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
RPM	Rotações por minuto
GPS	Sistema de posicionamento global

Lista de Símbolos

α	Ângulo do erro tipo A
β	Ângulo do erro tipo B
θ	Ângulo do giro da base

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre robótica móvel e odometria robótica, bem como a importância de realizar a calibração da odometria para utilização em algoritmos de localização e mapeamento. Os objetivos gerais e específicos deste trabalho de pesquisa, assim como a metodologia de desenvolvimento utilizada, são tratados nas seções finais deste capítulo.

1.1 Robótica móvel

Um robô ou base robótica é classificado em uma ou mais classes sendo elas: robôs industriais, médicos e móveis. A classe de robôs industriais englobam os sistemas capazes de realizar tarefas repetitivas que apresentem riscos físicos ou mentais a um operador humano. Geralmente os robôs dessa classe apresentam diferentes graus de liberdade (movimento) e capacidade de carga determinada através da aplicação.

A classe de robôs médicos, de cooperação ou reabilitação, está concebida como prótese inteligente para pessoas com necessidades físicas especiais, que se diferenciam do resto em sua forma, que procuram ter aparência da correspondente extremidade humana, e realizar as funções dessa, onde os sinais emitidos provenham de sinais nervosos ou musculares [Secchi, 2008]. Também na classe de robôs médicos estão aqueles destinados ao auxílio em cirurgias de alta complexidade ou precisão médica.

Na classe de robôs móveis estão inseridas as bases robóticas automáticas capazes de realizar transporte de cargas perigosas, ou tarefas de exploração solitária ou cooperativa junto a outros veículos não tripulados. O principal problema a ser resolvido em um robô móvel é gerar trajetórias e guiar seu movimento segundo estas, com base na informação proveniente do sistema de sensores externos (ultrassom, laser, visão), permitindo ao veículo mover-se entre os quaisquer pontos do ambiente de trabalho de maneira segura, sem colisão. Isso exige o projeto de sistemas de controle de trajetórias (posição, direção, velocidade) em diversos níveis hierárquicos, de maneira que o processamento da informação proveniente dos sensores externos assegure a maior autonomia possível [Secchi, 2008].

Neste contexto de robótica móvel o conceito de autonomia refere-se na liberdade para a base se locomover em um ambiente, sabendo onde é possível ou não alcançar os pontos ou localizações requeridas, sendo que para isso ser possível uma característica básica do sistema deve ser conhecida, a posição atual.

1.1.1 Posição atual

O posicionamento de uma base em um ambiente é uma comparação entre uma referência global P , definida para a base, e uma referência global O , definida para o ambiente. O ponto P é uma referência baseada no tipo de base robótica utilizada e independentemente do ambiente.

A referência global do ambiente O é um plano como ilustra a figura 1.1, onde os eixos X_I e Y_I definem as distâncias que o ponto P encontra-se em relação a O [Siegwart and Nourbakhsh, 2004]. O ponto P também é chamado de posição relativa da base.

No entanto, a posição relativa não é a única variável de localização calculada sendo também fundamental para o sistema de navegação saber a orientação θ que a base está localizada, com referência ao plano global. Essa orientação é definida ao iniciar a execução do ensaio, considerando como 0° o ângulo de giro da base, que está paralelo ao eixo das abcissas X_I . Ao rotacionar a base no sentido horário o valor do ângulo de giro é decrementado, enquanto que no sentido anti-horário o valor é incrementado. Portanto a posição atual da base em um ambiente é definida através de uma tripla $P(x,y,\theta)$.

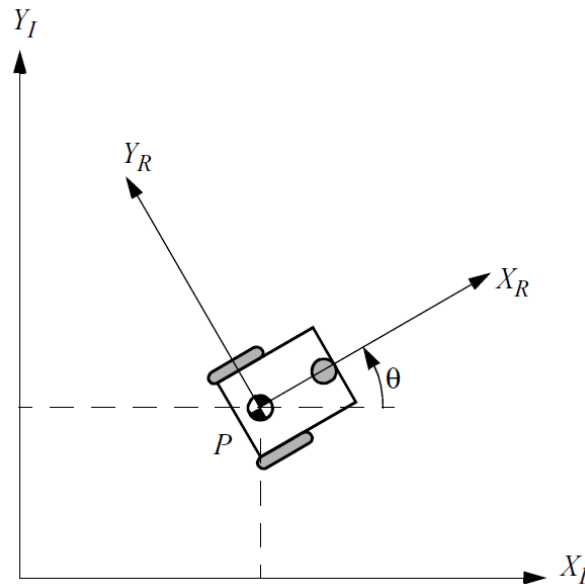


Figura 1.1: Base robótica disposta sobre um sistema de coordenadas cartesianas [Siegwart and Nourbakhsh, 2004]. X_r , Y_r e θ formam a tripla do posicionamento final da base.

1.1.2 Sensores

Muitos são os sensores utilizados em robótica móvel sendo os mais comuns os encoders, GPS, sensores ultra-sônicos, sensores a laser e câmeras. Os sensores são divididos em duas classes, sensores proprioceptivos e exteroceptivos.

Os sensores proprioceptivos medem valores internos ao sistema (robô); por exemplo, velocidade dos motores, carga da roda, ângulo dos braços do robô e tensão da bateria. Os sensores exteroceptivos adquirem informações do ambiente que o robô trafega; por exemplo, medições de distância, intensidade luminosa e amplitude sonora. Tais medições são interpretadas pelo robô com o objetivo de extrair características significativas do ambiente [Siegwart and Nourbakhsh, 2004].

No contexto de localização para robótica móvel os sensores proprioceptivos se destacam devido a facilidade de leitura e grau de precisão elevada, como é o caso dos encoders digitais.

Um encoder digital típico usa dois discos ópticos para fornecer uma série de pulsos ao sistema de medição, sendo esses discos constituídos por vários recortes igualmente espaçados, os quais têm por finalidade permitir a passagem de luz. Quando o encoder é rotacionado e o disco coloca-se em movimento observa-se a passagem/não passagem de luz através do disco, possibilitando a contagem dos pulsos pelo sistema eletrônico designado. A quantidade de recortes presentes no disco define a precisão mecânica fornecida pelo equipamento.

De modo a facilitar a identificação de inversão de sentido de giro e também para aumentar a precisão de leitura, dois discos idênticos são acoplados igualmente ao eixo do equipamento com os recortes precisamente defasados em 90° . Isto resulta na facilidade de identificação do sentido de giro e possibilita a leitura através do modo de quadratura [Braga, 2009], o que aumenta em duas vezes a precisão do equipamento. Na figura 1.2 o sinal de saída de cada um dos discos presentes no encoder é representado através dos pinos A e B, onde verifica-se a diferença de leitura quando em sentido horário e anti-horário de giro.

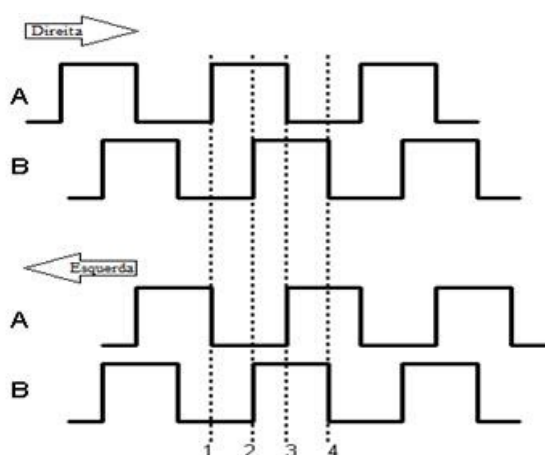


Figura 1.2: Sinais de saída A e B para um encoder incremental [Braga, 2009]. Com a defasagem de 90° entre as curvas, é possível identificar o sentido de giro do encoder.

1.2 Odometria e calibração da odometria

No contexto de robótica móvel, odometria é a capacidade de gerar dados de localização do robô através de medições dos sensores embarcados na base. Os sinais são recebidos pelo controlador que através de equações previamente estipuladas calcula a localização. Como os sinais são gerados a partir de sensores que medem os estímulos mecânicos da base, uma incerteza de medição é inserida e representada através de um erro. São dois os erros observáveis, sistemáticos e não-sistemáticos.

Erros sistemáticos são determinísticos e gerados por fatores internos da base robótica, por exemplo diferença de diâmetro entre as rodas, falta de alinhamento dos eixos, capacidade de medição limitada e erros de modelamento.

Erros não-sistemáticos são estocásticos e gerados por fatores internos ou não a base robótica. Suponha que a base robótica trafega em uma região de alta aderência para as rodas, condição ideal para tráfego do robô. No entanto uma das rodas passa sobre uma região de baixa aderência e a base robótica modifica indevidamente sua trajetória. Com esse ocorrido o sistema de odometria calcula uma posição, mas a posição real da base é outra. Outro exemplo é a colisão da base com objetos no ambiente que está trafegando, o que também modifica a orientação da base sem o conhecimento do sistema de odometria.

De forma geral, quanto maior for a frequência de inserção de erros no sistema, mais longe a odometria estará da posição real da base e, portanto, quanto menos erros forem inseridos melhor será o resultado. Uma estratégia para contornar os erros que são inseridos na base é medir o quanto os erros afetam o sistema e então balancear as variáveis mecânicas através dos resultados obtidos, sendo definido um processo de calibração.

Este trabalho de pesquisa trata da investigação de uma forma alternativa de calibração da odometria onde é considerada a redução dos erros não-sistemáticos provenientes do solo de teste. Como forma de validação do estudo, os métodos clássicos também são apresentados e comparados.

No apêndice A são apresentadas as deduções das equações para calcular a odometria, as quais são utilizadas na odometria da base robótica desenvolvida para este estudo, que é apresentada no capítulo 3.

1.3 Objetivo geral

- Investigar uma forma de calibração alternativa aos métodos clássicos conhecidos atualmente, buscando reduzir a quantidade de erros não-sistemáticos provenientes do solo de teste, com a redução do espaço necessário para realizar o ensaio.

1.4 Objetivos específicos

- Desenvolver uma base robótica de forma a compreender as limitações mecânicas impostas pelos componentes do sistema e que serve de ferramenta principal para a execução e validação da alternativa de calibração proposta;
- Propor uma forma de calibração de odometria, visando reduzir os erros não-sistemáticos observáveis durante os ensaios de calibração;
- Validar o algoritmo propostos através de modificações mecânicas na base, seguidas pela calibração;
- Comparar os resultados obtidos com os métodos clássicos utilizados.

1.5 Metodologia

- Desenvolver a base robótica baseando o projeto mecânico e elétrico nos modelos de robôs atualmente comercializados;
- Estipular uma série de ensaios avaliativos para validar o funcionamento da base;
- Realizar a calibração da odometria fazendo uso dos métodos clássicos de calibração;
- Realizar a calibração da odometria fazendo uso do método proposto neste estudo;
- Concluir o estudo através da comparação do método proposto, com os demais apresentados.

1.6 Considerações

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos sobre robótica móvel, localização, mapeamento e odometria robótica, focando na importância da calibração para os sistemas robóticos.

No próximo capítulo são apresentados os modelos clássicos de calibração com detalhes as etapas de ajuste dos erros.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

Neste capítulo são apresentados dois procedimentos de calibração utilizados como referência comparativa ao método proposto neste estudo, o procedimento *UMBmark* [Borenstein and Feng, 1995] e o procedimento de erros adjuntos [Jung and Chung, 2012].

2.1 O procedimento de verificação *UMBmark*

O procedimento é baseado na execução de uma sequência de testes que faz uso de um padrão previamente conhecido e aferido, sendo este um quadrado de 4x4m de comprimento. Menciona-se em [Borenstein and Feng, 1996a] a necessidade de construir o quadrado próximo a uma parede de referência, para que a base robótica seja sempre posicionada no mesmo ponto de início, garantindo assim, a coerência nos ensaios. Neste estudo sugere-se outra forma de referenciamento através do uso de um prisma, o qual possibilita o contato entre as laterais do robô e a linha de referência no solo de teste, conforme é ilustrado na figura 2.1.

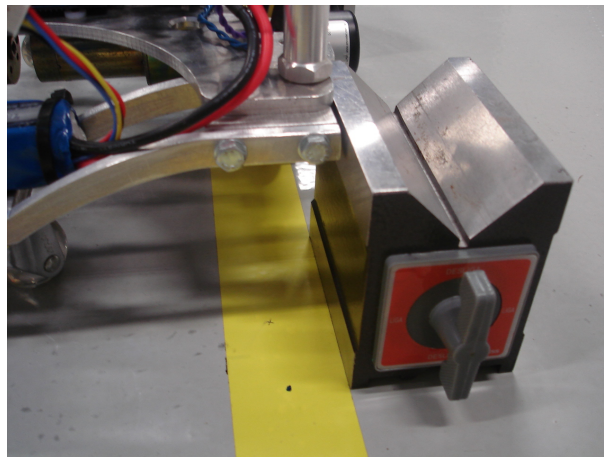


Figura 2.1: Referenciamento da base robótica. Um ponto plano e alinhado com as rodas deve ser o ponto de referenciamento.

O ensaio é executado no sentido horário e anti-horário de giro, cinco vezes para cada lado, e ao fim de cada execução calcula-se o erro apresentado pela base através das equações 2.1 e 2.2. Nas equações os termos X_{abs} e Y_{abs} são as posições reais de parada da base com referência ao ponto de início nas coordenada X e Y , respectivamente. Os termos X_{calc} e Y_{calc}

são os valores de parada da base do ponto de vista dos cálculos da odometria, nas coordenadas X e Y , respectivamente.

$$eX = X_{abs} - X_{calc} \quad (2.1)$$

$$eY = Y_{abs} - Y_{calc} \quad (2.2)$$

Obtendo os conjuntos de dados, as médias para os eixos X e Y são calculadas através das equações 2.3 e 2.4. O objetivo de utilizar as médias dos valores adquiridos é diminuir a dispersão dos pontos provenientes dos erros não-sistemáticos inerentes ao ambiente de teste.

$$mX_{cw/ccw} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n eX(i) \quad (2.3)$$

$$mY_{cw/ccw} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n eY(i) \quad (2.4)$$

O resultado do ensaio é obtido através do cálculo da distância euclidiana dos pontos X e Y médios calculados nas equações 2.3 e 2.4, com relação aos pontos de início e fim das medições, conforme equações 2.5 e 2.6. O maior erro obtido é o selecionado para avaliação, conforme equação 2.7.

$$euc_{cw} = \sqrt{(mX_{cw})^2 + (mY_{cw})^2} \quad (2.5)$$

$$euc_{ccw} = \sqrt{(mX_{ccw})^2 + (mY_{ccw})^2} \quad (2.6)$$

$$eMax = \max(euc_{cw}, euc_{ccw}) \quad (2.7)$$

Para fins de visualização podem ser apresentados os pontos coletados em um gráfico de dispersão padrão, onde observa-se a dispersão dos pontos com relação ao ponto médio observado, conforme ilustrado pela figura 2.2.

Como o objetivo da calibração é reduzir a quantidade de erro inserido no sistema, se faz necessário primeiramente compreender quais são as fontes desses erros, sendo que a melhor forma de fazer isso é observá-los separadamente.

2.1.1 Erro tipo A

Os erros tipo A são observados quando o valor da distância entre as rodas é diferente do valor informado aos cálculos de odometria. No apêndice A esta constante de distância é chamada *Dbaseline* e seu valor é utilizado para calcular os movimentos de giro da base. Portanto quando a odometria não possuiu o valor correto observado na estrutura mecânica, a base realiza giros não equivalentes ao solicitado. Se é atribuído a constante um valor maior do que o observado na estrutura mecânica, então o ângulo de giro será menor que o solicitado e, de forma análoga, se for menor a base apresentará um ângulo de giro maior.

É ilustrado um exemplo de trajetória com erro tipo A na figura 2.3, em que a constante *Dbaseline* possuiu um valor maior que o observado fisicamente. O movimento ideal programado na base seria fazer a trajetória correspondente a um quadrado com lados de 4m de comprimento

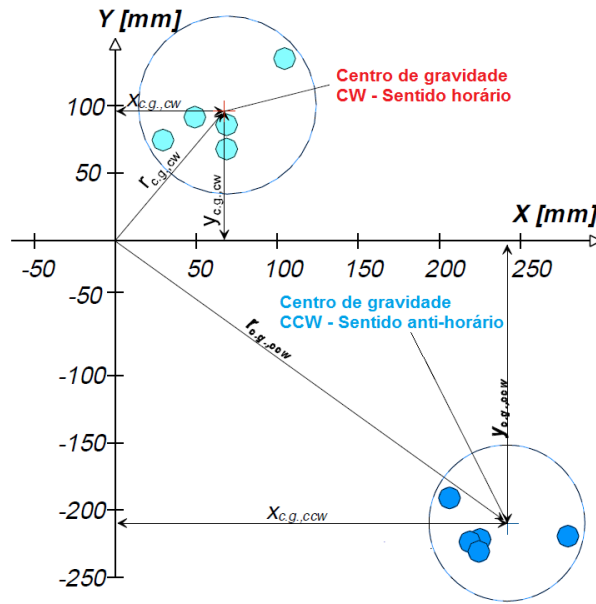


Figura 2.2: Apresentação dos dados adquiridos durante o processo de calibração. [Borenstein and Feng, 1995]. O centro de gravidade é a média de todos os pontos adquiridos para o sentido horário e anti-horário de giro.

e cantos de 90° . No entanto, devido ao erro na constante $Dbaseline$, o movimento de giro é somente 85° , fazendo com que a base termine a trajetória fora do ponto programado.

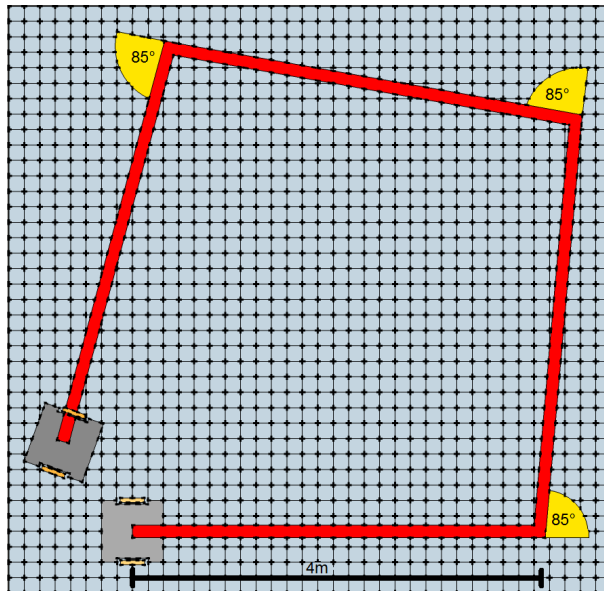


Figura 2.3: Erro característico tipo A. Valor da constante $Dbaseline$ não representa o valor real apresentado na base robótica.

2.1.2 Erro tipo B

Erros do tipo B são provenientes da diferença de diâmetro entre as rodas do robô e apresentam um comportamento característico, como ilustrado na figura 2.4. Na figura a roda da direita apresenta diâmetro menor que a roda da esquerda, fazendo com que a base realize

um movimento não linear de deslocamento, resultando no posicionamento errado ao final da trajetória programada.

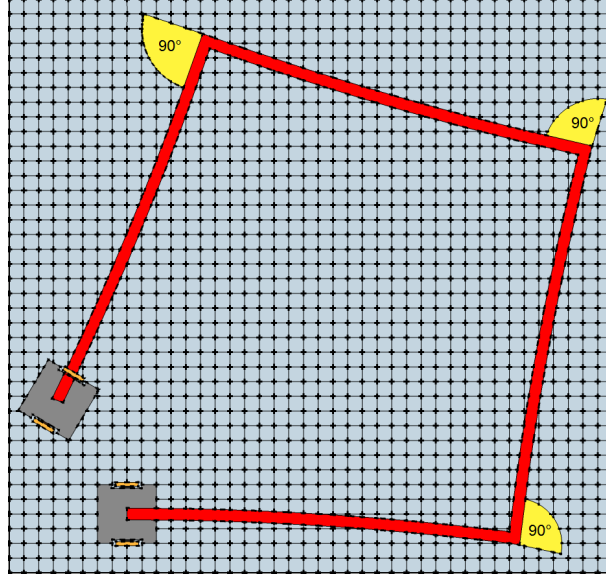


Figura 2.4: Erro característico tipo *B*. Os diâmetros individuais de cada uma das rodas não representam o valor real apresentado na base. Neste exemplo a roda direita é menor que a roda esquerda.

2.2 O procedimento de calibração *UMBmark*

No procedimento *UMBmark* os cálculos de calibração são realizados separadamente e sem correlação entre os resultados obtidos, sendo este o fator que diverge do método de erros adjuntos apresentado na seção 2.3. Neste trabalho de pesquisa é apresentado primeiramente a correção dos erros tipo *A* e então dos erros tipo *B*. Porém devido a não correlação entre os erros, essa ordem não é uma premissa.

2.2.1 Erro tipo *A*

A correção inicia-se pela relação apresentada por [Borenstein and Feng, 1996b], onde a distância *Dbaseline* é inversamente proporcional a quantidade atual de giro realizado pela base, conforme equação 2.8.

$$E_b = \frac{90}{90 - \alpha} \quad (2.8)$$

O termo α representa o erro de giro real da base através do cálculo da equação 2.9. Aplicando o valor de α calculado na equação 2.8 obtém-se o percentual de erro da constante *Dbaseline* que deve ser corrigido. A figura 2.5 ilustra o termo α observado durante a realização do ensaio.

$$\alpha = \frac{(mX_{cw} + mX_{ccw})}{-4L} \quad (2.9)$$

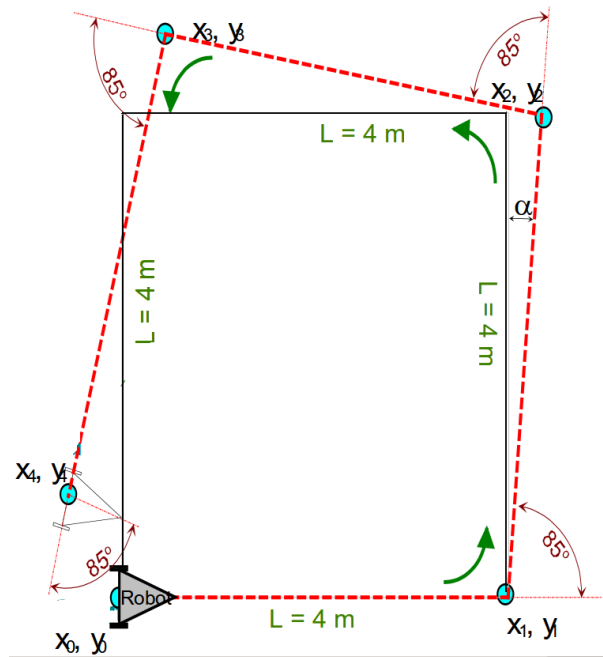


Figura 2.5: Representação do componente α no erro tipo A [Borenstein and Feng, 1995].

2.2.2 Erro tipo B

Para iniciar a dedução dos erros tipo B é importante primeiro observar a trajetória que a base percorre quando esse erro está presente no sistema. A figura 2.6 ilustra a trajetória da base de forma exagerada, possibilitando assim, definir os termos utilizados para dedução das equações.

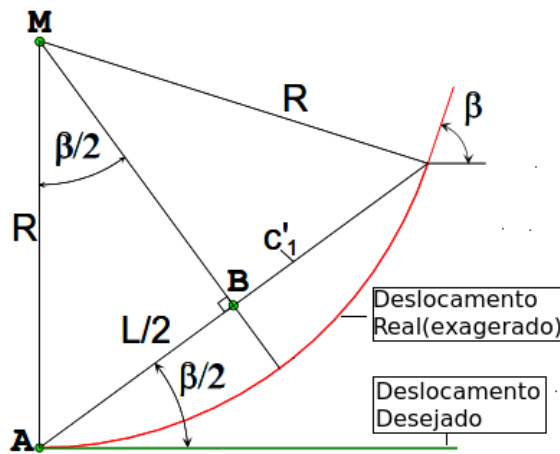


Figura 2.6: Relações geométricas de deslocamento [Borenstein and Feng, 1995]. R é o raio de curvatura apresentado durante o deslocamento, devido ao erro tipo B.

Como existe o erro de diâmetro entre as rodas, a trajetória que foi programada para ser linear transforma-se em uma trajetória curva com raio R, sendo este cálculo realizado através da equação 2.10.

$$R = \frac{L/2}{\sin(\beta/2)} \quad (2.10)$$

O termo β , presente na equação 2.10, representa o ângulo de giro devido a trajetória não circular realizada pela base durante o deslocamento programado, sendo esse termo calculado através da equação 2.11.

$$\beta = \frac{(mX_{cw} - mX_{ccw})}{-4L} \quad (2.11)$$

Com os valores de R e β o termo corretivo para erros do tipo B é calculado através da equação 2.12. Para o caso hipotético, onde mecanicamente seja garantido a igualdade de diâmetro entre as rodas da base, o valor do termo E_d é 1 e, portanto, todo valor diferente representa o erro de diâmetro.

$$E_d = \frac{R_{left}}{R_{right}} \times \frac{R - D_{baseline}/2}{R + D_{baseline}/2} \quad (2.12)$$

2.3 O procedimento de calibração com erros adjuntos

Conforme apresentado no início da seção 2.2, o processo de calibração *UMBmark* considera que os erros tipo A e B atuam separadamente no sistema. No entanto, no estudo [Jung and Chung, 2012] os autores propõem que os erros devem ser avaliados em conjunto, ou seja, os erros apresentam correlação. Partindo desse conceito é necessário deduzir todo um novo conjunto de equações. Em [Jung and Chung, 2012] os autores apresentam detalhadamente todos os passos para as deduções das equações ficando reservado a esta pesquisa apresentar somente as equações relevantes.

As deduções são realizadas considerando novamente as relações geométricas ilustradas na figura 2.6 e o comportamento dos termos β e α como demonstrado pelas equações 2.13 e 2.14. Na equação 2.14 observa-se a relação entre os erros onde para o cálculo do ângulo α as duas componente de erro são utilizadas, ou seja, o diâmetro da roda também é levado em conta quando a base realiza um movimento de giro.

$$\beta = \sum_{i=1}^{pulses} \frac{((D_{right_{nominal}} + E_d) - (D_{left_{nominal}}))}{D_{baseline_{nominal}}} \quad (2.13)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^{pulses} \frac{((D_{right_{nominal}} + E_d) - (-D_{left_{nominal}}))}{D_{baseline_{nominal}} + E_b} \quad (2.14)$$

2.3.1 Erro tipo A

Os erros tipo A são corrigidos de forma semelhante ao procedimento *UMBmark* diferenciando somente os termos corretivos considerados, como demonstra a equação 2.16. Na equação α_{E_b} representa a parcela do erro de giro proveniente do erro tipo A e α_{E_d} a parcela proveniente do erro tipo B . Os termos são calculados através das equações 2.17 e 2.18, respectivamente.

$$E_b = \frac{90}{90 - \alpha} \quad (2.15)$$

$$\alpha_{x/y} = \alpha_{E_b} + \alpha_{E_d} \quad (2.16)$$

$$\alpha_x = \frac{(mX_{cw} + mX_{ccw})}{-4L} + \left(\frac{\pi \times D_{baseline}}{4 \times \left[\frac{-4 \times L^2}{(mX_{cw} - mX_{ccw})} - \left(\frac{D_{baseline}}{2} \right) \right]} \right) \quad (2.17)$$

$$\alpha_y = \frac{(mY_{cw} - mY_{ccw})}{-4L} + \left(\frac{\pi \times D_{baseline}}{4 \times \left[\frac{-4 \times L^2}{(mY_{cw} + mY_{ccw})} - \left(\frac{D_{baseline}}{2} \right) \right]} \right) \quad (2.18)$$

Por fim, para determinar um valor médio de α devido aos termos X e Y , a média entre α_x e α_y é calculada conforme demonstra a equação 2.19. Essa média não está originalmente descrita em [Jung and Chung, 2012], mas mostrou-se eficiente nos resultados avaliativos deste trabalho de pesquisa, ficando portanto, como optativo o uso da equação 2.19.

$$\alpha = \frac{\alpha_x + \alpha_y}{2} \quad (2.19)$$

2.3.2 Erro tipo B

O erro do tipo B é calculado similarmente ao procedimento *UMBmark*, diferenciando somente no termo $D_{baseline}$. Como existe conexão entre os erros, o termo $D_{baseline}$ deve ser multiplicado pelo fator E_b para que a correção seja feita utilizando-se do valor corrigido de $D_{baseline}$, como apresentado na equação 2.20.

$$E_d = \frac{\frac{\frac{L}{2}}{\sin(\frac{\beta}{2})} + \frac{D_{baseline} \times E_b}{2}}{\frac{\frac{L}{2}}{\sin(\frac{\beta}{2})} - \frac{D_{baseline} \times E_b}{2}} \quad (2.20)$$

Neste contexto, como o termo β é referente ao termo E_d , o cálculo é similar ao apresentado pelo procedimento *UMBmark*, conforme demonstrado na equação 2.21.

$$\beta = \frac{(mX_{cw} - mX_{ccw})}{-4L} \quad (2.21)$$

2.4 Aplicando a correção ao sistema

Para a correção do sistema os termos E_b e E_d são aplicados nas equações 2.22, 2.24 e 2.25 para o cálculo de odometria, sendo a correção equivalente para os dois modelos de calibração apresentados. Para o caso do erro tipo A não se faz necessário a adaptação do termo E_b , calculado pelo estudo, para que o valor seja aplicado como fator corretivo, sendo o termo multiplicado diretamente pelo valor nominal da variável $D_{baseline}$, obtendo assim o valor da constante corrigida, conforme apresentado na equação 2.22.

$$D_{baseline_{atual}} = E_b \times D_{baseline_{nominal}} \quad (2.22)$$

No caso dos erros tipo B uma adaptação deve ser feita de forma a manter correta a função de deslocamento da base, ou seja, manter o cálculo do deslocamento individual de cada roda correto. Essa coerência é garantida através da definição do valor nominal médio do raio das rodas, como apresenta a equação 2.23.

$$R_{constante} = \frac{R_{left_{nominal}} + R_{right_{nominal}}}{2} \quad (2.23)$$

Isolando os termos $R_{left_{nominal}}$ e $R_{right_{nominal}}$ na equação 2.23, torna-se possível calcular os valores corrigidos para o raio de cada roda da base através das equações 2.24 2.25.

$$R_{left_{corrigido}} = \frac{2}{E_d + 1} \times R_{constante} \quad (2.24)$$

$$R_{right_{corrigido}} = \frac{2}{1/E_d + 1} \times R_{constante} \quad (2.25)$$

2.5 Considerações

Neste capítulo apresentou-se a descrição dos dois métodos de calibração comparados por este estudo, focando principalmente nas fórmulas para correção do sistema de odometria.

No próximo capítulo a base robótica desenvolvida para este estudo é apresentada e suas características funcionais são extraídas, fazendo uso de uma série de ensaios também propostos por este estudo.

Capítulo 3

Plataforma experimental

Neste capítulo são apresentados os conceitos e práticas para o desenvolvimento da base robótica utilizada por este estudo, iniciando pela apresentação dos projetos mecânico e eletrônico e partindo para o método de controle. Ensaaios de teste para validar a eficiência da base e do controle utilizado são também apresentados neste capítulo.

Ao fim discute-se as estratégias de controle comparadas, avaliando a diferença de desempenho entre cada proposta através da análise do erro da base.

3.1 Projeto mecânico e eletrônico

Considerando o objetivo do estudo para o qual a base robótica foi desenvolvida, escolheu-se por construir um modelo mecânico tipicamente chamado de “direção diferencial”. Tal modelo constitui-se de duas rodas paralelas montadas sobre uma mesma referência mecânica, onde se espera o melhor alinhamento possível entre as rodas e a base, assim como perpendicularmente entre os sistemas motores. As figuras 3.1 e 3.2 ilustram o alinhamento esperado pelo tipo de base desenvolvida e, no apêndice B, uma tabela resume as características construtivas da base desenvolvida.

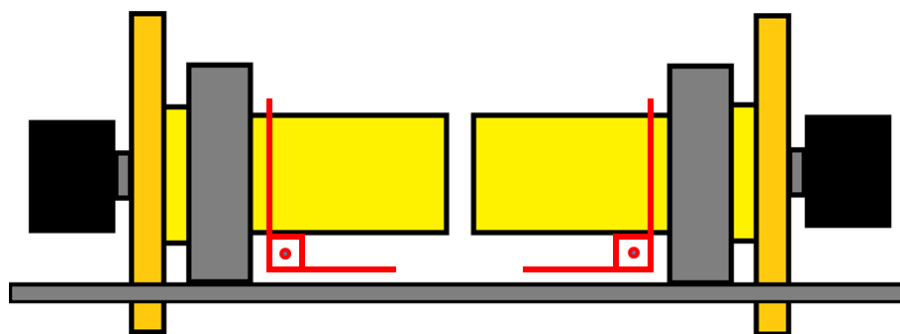


Figura 3.1: Vista frontal de um modelo direção diferencial, onde o ângulo de 90° entre as rodas e a superfície de apoio deve ser observado fisicamente na base.

Uma das partes relevantes em elaborar uma base robótica para odometria é a necessidade de interligar componentes mecânicos com hardware e software. Neste caso, a interligação existe com a implementação das equações que regem os movimentos da base internamente no controlador. Uma lista com a demonstração completa das equações mecânicas de uma base robótica do tipo "direção diferencial" é apresentada no apêndice C.

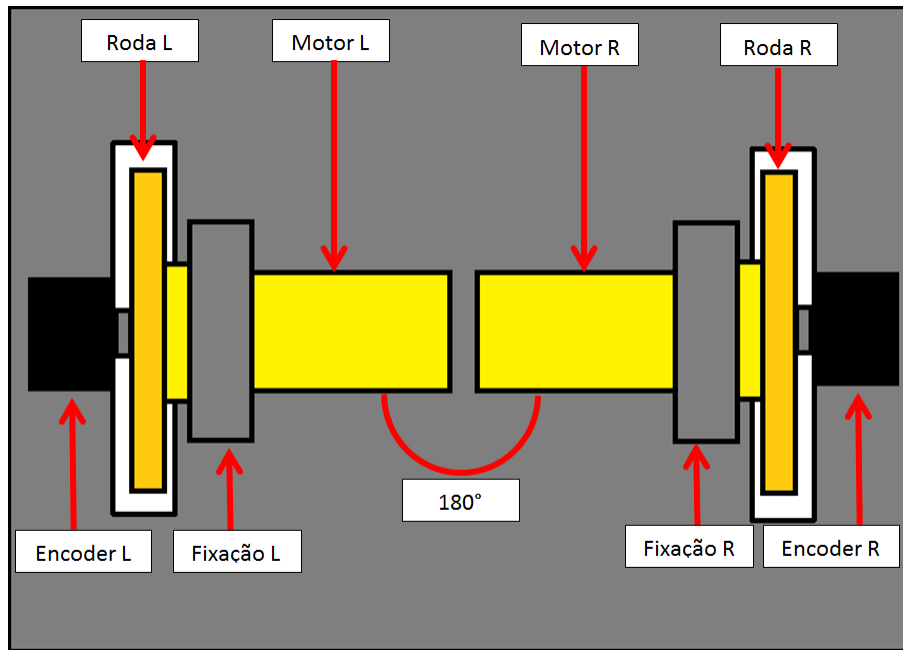


Figura 3.2: Vista superior de um modelo direção diferencial. Neste ponto de vista os motores devem estar alinhados, formando um ângulo de 180° entre os pontos de fixação.

Tabela 3.1: Características da placa Arduino Mega2560

Microcontrolador	Atmega2560
Tensão de operação	5V
Entrada e saída digital	54 (15 PWM)
Resolução saída digital	8bits
Corrente máxima por pino	20mA
Entrada analógica	16
Memória de instrução	256KB
Memória EEPROM	4KB
Velocidade do clock	16MHz

A representação em software das constantes mecânicas da base são as principais fontes de inserção dos erros sistemáticos no sistema, pois é utilizando dessas constantes que o sistema calcula o posicionamento da base através da odometria. Assim, prova-se que somente através da exatidão mecânica os erros sistemáticos são completamente eliminados dos sistemas, mas como em qualquer modelagem mecânica nunca atinge-se exatidão plena na construção dos componentes, os erros sistemáticos sempre estarão presentes, ficando como tarefa da calibração minimizar esses erros.

Todos os cálculos mecânicos e os cálculos de odometria são realizados internamente em um controlador. O controlador recebe as informações dos sensores, calcula com as informações da base através das equações mecânicas e de odometria, e gera impulsos para movimentar a base através dos motores. Como este projeto de pesquisa é uma aplicação acadêmica e muitas modificações de software e hardware são necessárias durante o desenvolvimento, optou-se por um utilizar um controlador de prototipagem chamado *Arduino Mega2560*. As características básicas desse controlador são apresentadas na tabela 3.1 e uma visão geral é ilustrada na figura 3.3

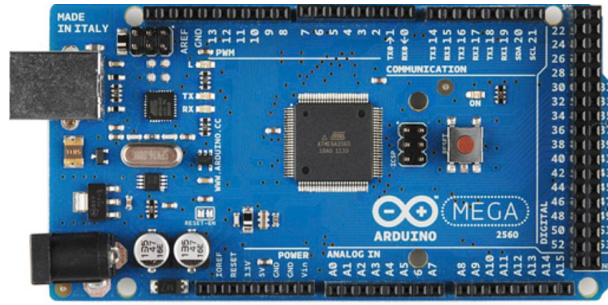


Figura 3.3: Placa Arduino Mega2560 [Arduino, 2016].

Como apresenta a tabela 3.1, o controlador é um componente que consegue drenar no máximo 20mA de corrente em cada pino de saída, com uma limitação de tensão de 5Vcc. No entanto, os motores utilizados pela base são componentes que chegam a consumir até 10A de corrente e trabalhar com tensão de 12Vcc, ou seja, o controlador deve ser capaz de drenar uma corrente 500 vezes maior que sua capacidade. Para esse caso, o controlador sozinho não seria capaz de resolver o problema, necessitando de um *Drive* adicional para os motores. O *Drive* é um amplificador que recebe um sinal de baixa tensão e corrente como entrada e converte esse sinal em um nível de tensão e corrente elevada, limitado também a sua capacidade de trabalho, possibilitando, portanto, controlar cargas elevadas com sinais de baixa amplitude.

O projeto eletrônico é concluído interligando todos os componentes de hardwares com o controlador, como ilustrado na figura 3.4.

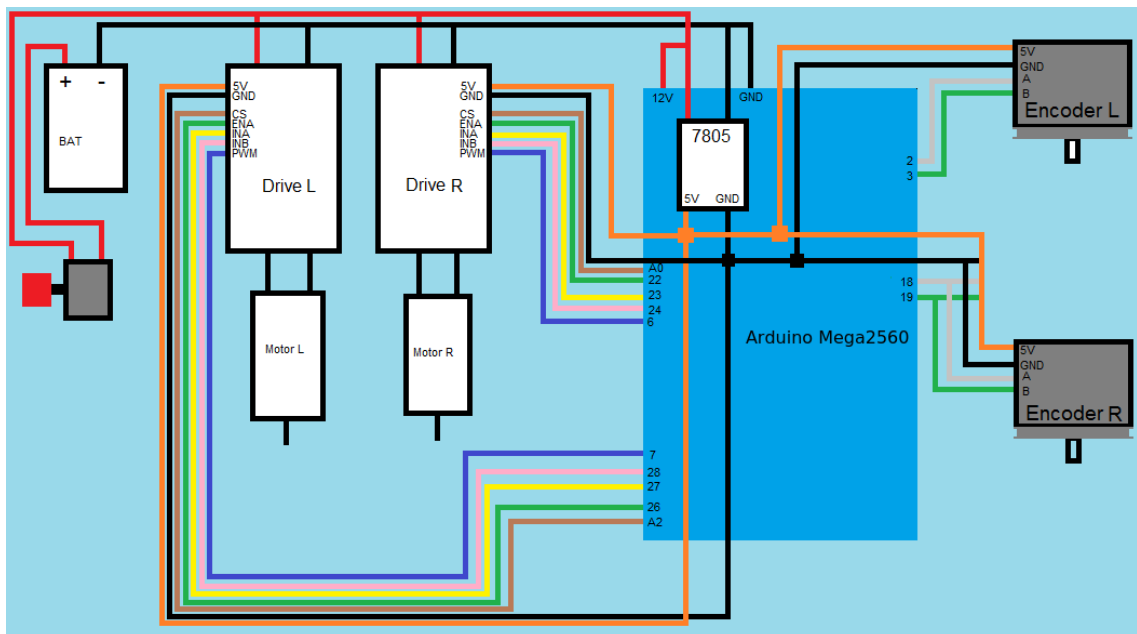


Figura 3.4: Projeto eletrônico completo da base desenvolvida.

3.2 Estratégias de controle

Quando o software de controle recebe uma solicitação de movimentação e calcula a intensidade de atuação dos motores da base, algumas ponderações são feitas com base no controlador utilizado. O controlador conhece o estado de cada sensor presente na base, o tipo

de deslocamento que será realizado, a posição atual e o destino solicitado, e com isso calcula a intensidade de corrente que deve ser aplicada aos motores para melhor atender ao comando solicitado.

Um controlador clássico utilizado é o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID). A ideia básica de um controlador PID é ler um sensor, calcular a resposta de saída para o atuador através do controlador PID e, então, somar os três componentes para determinar a saída dos atuadores [Instruments, 2016]. Neste contexto, os sensores são os encoders acoplados as rodas do robô e a saída é a intensidade de corrente aplicada aos motores.

O controlador PID pode ser incorporado ao software de controle de muitas formas, sendo a mais básica através do controle individual dos motores em malha fechada. Neste caso, cada motor dispõe de um controlador que atua individualmente no sistema preocupando-se somente com o sensor e o atuador que lhe foi designado, conforme ilustrado na figura 3.5.

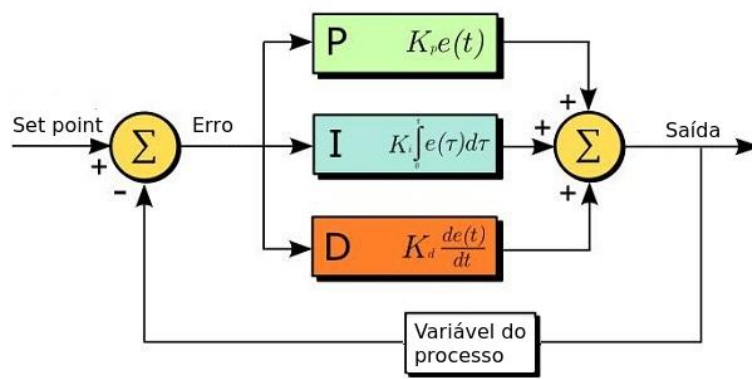


Figura 3.5: Controlador PID completo em malha fechada [Instruments, 2016]. Neste modelo cada motor é controlado individualmente, observando somente o encoder de referência acoplado ao motor.

Este tipo de controle funciona suficientemente bem quando não existe a dependência de outras variáveis do sistema que estejam desacopladas do controle principal, como é o caso do controle individual de cada motor. No entanto, para a base desenvolvida por este estudo, todos os componentes devem ser acoplados, ou seja, a correção de trajetória do motor esquerdo não é realizada somente com base no encoder esquerdo, mas também com base no encoder da roda direita, pois assim sabe-se o nível de intensidade que deve ser aplicado para manter o deslocamento o mais próximo possível do solicitado.

Para realizar o acoplamento dos componentes do sistema uma estratégia de controle chamada *Cross-coupling* é utilizada. Através dessa estratégia cada saída é calculada com base no estado de todos os componentes que formam o sistema, possibilitando assim a redução dos erros de controle. A figura 3.6 ilustra o controlador *Cross-coupling* incorporado a malha de controle da base desenvolvida.

Observa-se na figura 3.6 que mesmo adicionando ao sistema um controlador *Cross-coupling* na malha principal, cada motor necessita de um controlador PID individual, pois sem esses os motores não realizam movimento algum, ou seja, o controle PID individual busca atingir o objetivo específico de cada motor, enquanto que o controle *Cross-coupling* busca reduzir o erro de deslocamento apresentado entre os componentes do sistema.

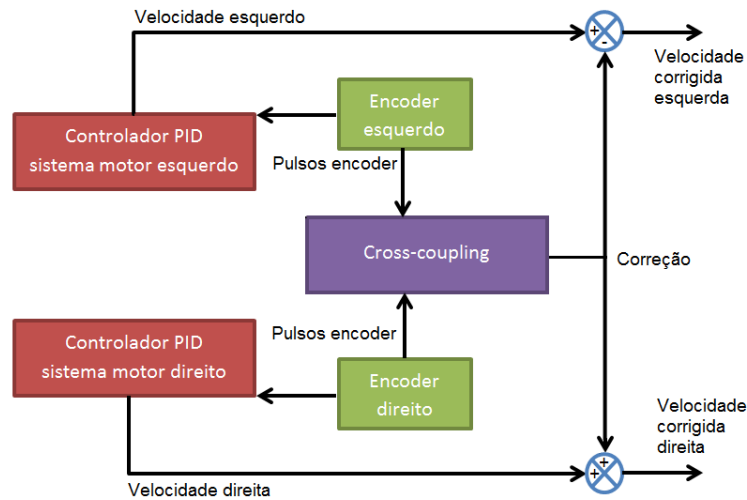


Figura 3.6: Malha de controle da base com adição do controlador *cross-coupling*. Neste modelo a correção é feita observando os pulsos dos dois encoders.

3.3 Validação da base robótica

Para validar a base robótica desenvolvida por este estudo optou-se por elaborar dois ensaios de testes visando comparar a diferença de desempenho entre os métodos de controle propostos. O objetivo de cada um dos ensaios é avaliar o erro apresentado pela base e o nível de correção que o controle utilizado apresenta.

Neste estudo, onde se trabalha com um sistema do tipo "direção diferencial", espera-se que para uma trajetória em linha reta os encoders esquerdo e direito apresentem exatamente a mesma contagem de pulsos para o período em que a medição é realizada, ou seja, erro igual a 0 é a condição ideal para o sistema. No entanto, devido aos erros provenientes do controle, mal funcionamento dos motores e encoders, ou qualquer outra fonte de ruído, ocorre a diferença de leitura. Essa diferença é definida como *erro* e é expressa através da equação 3.1.

$$erro = \sum_{i=1}^{\infty} (Dleft_i - Dright_i) \quad (3.1)$$

3.3.1 Velocidade dos motores

Avalia-se neste ensaio a velocidade apresentada por cada motor utilizado pela base. O objetivo final é verificar uma possível fonte de erros sistemáticos provenientes dos motores. O ensaio é realizado seguindo os passos abaixo:

- Fixar o motor e o encoder em uma base rígida utilizando da mesma referência para os dois equipamentos;
- Acoplar o eixo do encoder diretamente ao eixo do motor;
- Prover um sistema de aquisição para coletar os dados calculados de erro da base;
- Programar a base para realizar um deslocamento linear de 4m, seguindo o padrão proposto pelo método *UMBmark*;
- Inicializar o deslocamento e o software de aquisição.

3.3.2 Deslocamento linear

Avalia-se neste ensaio a capacidade de deslocamento linear apresentado pela base robótica. O objetivo final é verificar a diferença de diâmetro entre as rodas do robô. O ensaio é realizado seguindo os passos abaixo:

- Sobre uma base plana traçar uma linha perfeitamente reta com comprimento mínimo de 4m, seguindo o padrão proposto pelo método *UMBmark*;
- Em uma das extremidades demarcar um ponto de início para que a base possa ser alinhada com a linha padrão do ensaio;
- Identificar na base robótica um ponto de referência que será utilizado para medir o deslocamento da base;
- Programar a base robótica para realizar um deslocamento linear de 4m, seguindo o padrão proposto pelo método *UMBmark*;
- Inicializar o ensaio;
- Ao atingir o ponto de destino medir o deslocamento da base com relação a linha padrão, nas orientações *X* e *Y* do plano cartesiano.

3.3.3 Resultados dos ensaios propostos

Os ensaios previamente propostos foram avaliados para as condições de malha aberta, malha fechada e *Cross-coupling*. O resultado para o ensaio *Velocidade dos motores* é apresentado na figura 3.7 e o resultado para o ensaio *Deslocamento linear* é apresentado na figura 3.8.

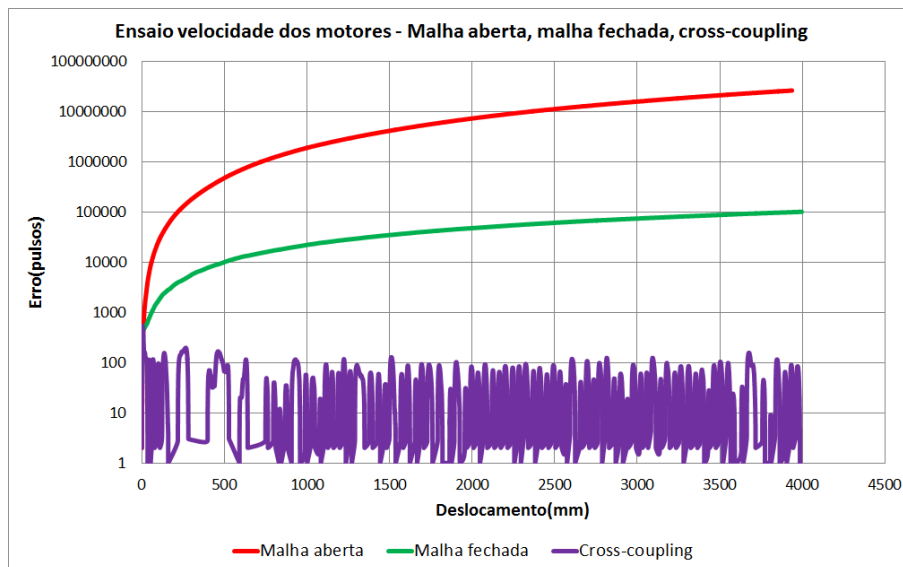


Figura 3.7: Resultado para o ensaio *velocidade dos motores* com os controles malha aberta, malha fechada e *cross-coupling*. O único modelo que controla o erro é o *cross-coupling*.

Na figura 3.7 é possível observar que os dados são apresentados em escala logarítmica e isso se deve a grande diferença de desempenho entre os métodos de controle avaliados. Com relação aos resultados observados percebe-se que o controle *Cross-coupling* é o que apresenta melhor desempenho, visto ser o único a conseguir manter o *erro* próximo de zero. Os controles

em malha aberta e malha fechada apresentam duas características pouco interessantes ao propósito de minimizar o *erro*, sendo que nos dois casos o *erro* não se mantém próximo a zero e também não existe controle sobre o crescimento do *erro*, ou seja, o erro aumenta infinitamente.

Os resultados da falta de controle para as condições de malha aberta e malha fechada refletem diretamente no teste de *Deslocamento linear*, conforme é ilustrado na figura 3.8, onde observa-se novamente que o controle em malha aberta e malha fechada apresentam valores de parada distantes do ponto de referência. Como é normal em qualquer sistema mecânico, mesmo fazendo uso do controle *Cross-coupling*, o ponto de parada não é exato na referência, mas novamente esse é o método que apresenta o menor *erro* final.

Ao fim, o controle *Cross-coupling* é o utilizado para a base desenvolvida, sendo o que apresenta os melhores resultados para os ensaios propostos.

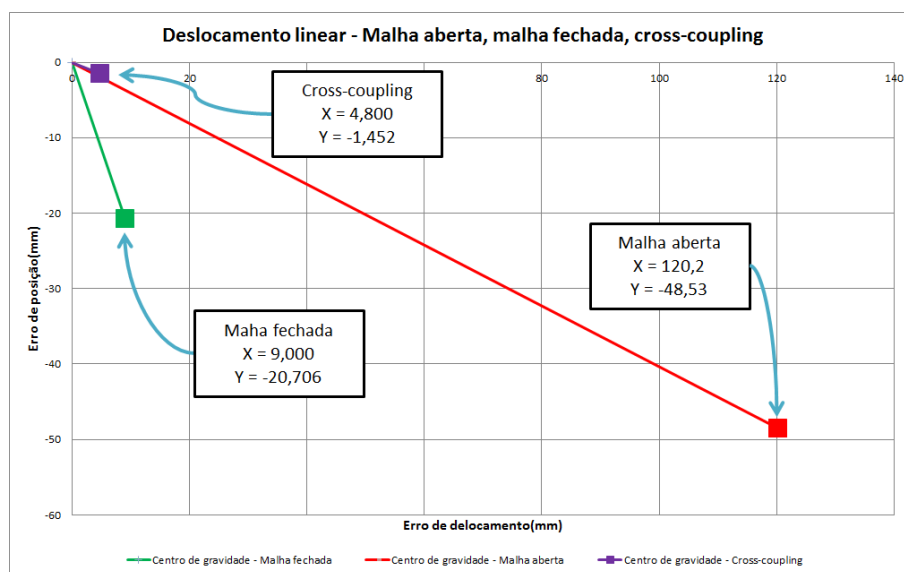


Figura 3.8: Resultado para o ensaio *deslocamento linear* com os controles malha aberta, malha fechada e *cross-coupling*. O modelo *cross-coupling* é o que melhor posiciona a base no fim do ensaio.

3.4 Discussão

Como observado nos resultados do teste *Deslocamento linear*, o *erro* apresentado pela base no ponto de parada não é nulo, sendo normal devido às características mecânicas da base. No entanto, o mais importante neste ponto, é observar que mesmo sem realizar calibração alguma na base robótica é possível reduzir, consideravelmente, o *erro*, somente fazendo uso de um método de controle eficaz, como é o caso do método *Cross-coupling*.

No caso desse desenvolvimento, modificar o método de controle torna-se uma tarefa simples, já que a base foi construída por completo para este estudo. No entanto, ao trabalhar com bases robóticas comercializadas para fins acadêmicos nem sempre o *software baixo* é palpável ao pesquisador, ficando portanto totalmente dependente de um sistema de calibração.

De forma geral, muitas são as formas de diminuir o *erro* apresentado com recursos de software, hardware ou construção mecânica, sendo que quanto maiores forem as contribuições para reduzir o *erro*, mais eficiente será o método de calibração escolhido para calibrar a base.

3.5 Considerações

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos para a construção da base robótica utilizada neste estudo, contemplando as características principais dos componentes utilizados no desenvolvimento. Visando analisar a melhor forma de controle para o modelo escolhido, a base foi submetida a dois ensaios de teste e o resultado utilizado para definir a malha de controle da base, sendo o método *Cross-coupling* a melhor opção para este desenvolvimento.

No próximo capítulo é apresentado o método de calibração proposto por este estudo, utilizando recursos de simulação computacional durante a realização de um deslocamento rotacional para definir as equações de correção.

Capítulo 4

Procedimento de calibração

Neste capítulo é apresentado o procedimento de calibração proposto por este estudo através do detalhamento do ensaio e das deduções das equações de correção. Ao fim discute-se as diferenças entre os métodos apresentados no capítulo 2 com o método deste estudo.

4.1 Características do deslocamento rotacional

Antes de partir diretamente para as equações de calibração é importante analisar o comportamento apresentado pela base robótica durante a realização de um deslocamento rotacional.

Imaginando uma base robótica que apresente configurações mecânicas idealmente exatas, que esteja trafegando sobre um solo idealmente linear e nenhuma fonte de erro não-sistemático seja inserido no sistema, duas relações da base são exatas e demonstradas através das equações 4.1 e 4.2, sendo que a primeira equação é relacionada a distância entre as rodas e a segunda ao diâmetro das rodas. Como as condições são consideradas ideais, os termos apresentam valor 1.

$$BaseRate = \frac{BaselineCalibrado}{BaselineReal} = 1 \quad (4.1)$$

$$WheelRate = \frac{Rleft}{Rright} = 1 \quad (4.2)$$

No entanto, quando existe a variação destes valores, a base apresenta dois comportamentos característicos. O primeiro é observado quando a relação entre as rodas é diferente de 1, sendo que nessa condição é observável que, ao final de um giro de 180°, a base apresenta um deslocamento lateral no sentido do eixo *Y*, como ilustrado na figura 4.7. Esse deslocamento foi observado variando-se fisicamente os diâmetros das rodas da base, mas mantendo a relação *WheelRate* fixa nas equações para o cálculo de odometria. Foram utilizadas ao total 10 rodas, sendo que, 5 rodas com diâmetros menores que o nominal e 5 rodas com diâmetros maiores que o nominal. Para os dois pares de 5 rodas, a modificação dos diâmetros foi feita com distribuição de 4mm para cada roda, conforme tabela 4.1.

Como a curva apresentada tem como principal característica ilustrar o deslocamento real realizado pela base, é possível, através de uma curva de aproximação linear, definir uma equação para este tipo de deslocamento, onde seja possível extrair a relação *WheelRate* através do

Tabela 4.1: Diâmetros utilizados para as rodas

Rleft(mm)	Rright(mm)	WheelRate
237	277	0,856
241	273	0,883
245	269	0,911
249	265	0,940
253	261	0,969
257	257	1,000
261	253	1,032
265	249	1,064
269	245	1,098
273	241	1,133
277	237	1,169

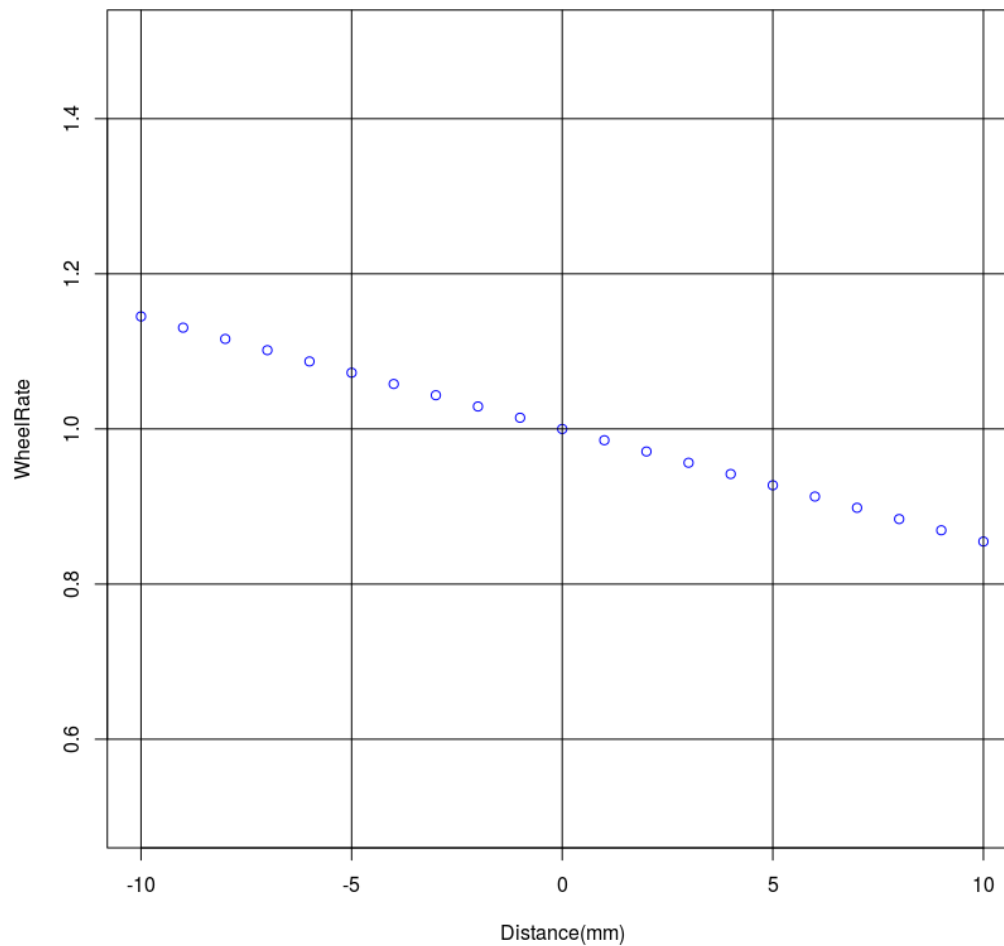


Figura 4.1: Curva característica de deslocamento rotacional de 180°.

posicionamento final da base após um deslocamento de 180°. A realização dessa aproximação polinomial resulta na equação 4.3, utilizada posteriormente para calibrar os diâmetros das rodas.

$$WheelRate = -0.01451 \times Y + 1 \quad (4.3)$$

O outro comportamento observado é o ângulo de giro final da base quando a variável *BaselineCalibrado* não possui o valor físico apresentado pela base robótica. Nesta condição quando o valor ajustado é maior que o valor real, a base apresenta um deslocamento menor que o solicitado e por consequência quando o valor ajustado é menor, a base apresenta um ângulo de giro maior.

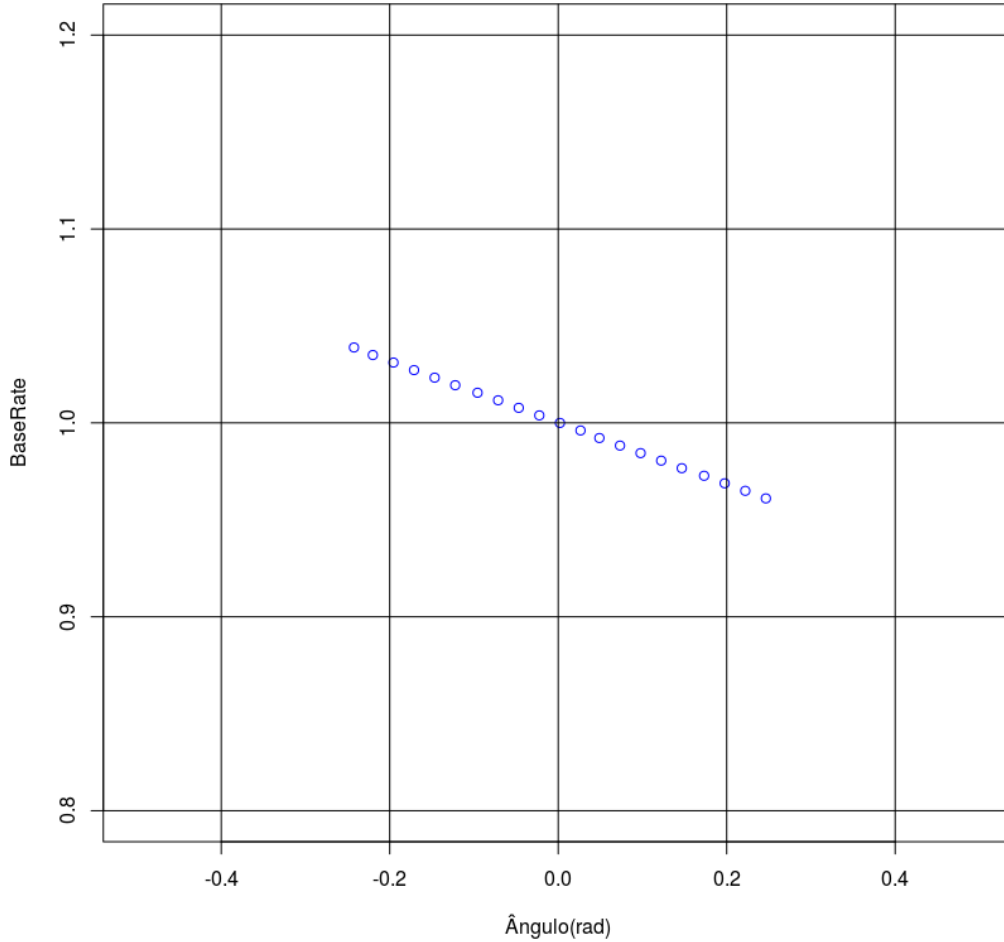


Figura 4.2: Curva característica de deslocamento rotacional - Sentido horário de giro.

Este comportamento é ilustrado nas figuras 4.2 e 4.3, onde é possível observar a característica de crescimento linear da variável *BaseRate*, com o incremento do ângulo final de giro. Deste modo uma aproximação por curva linear é suficiente para definir as equações de calibração para o sentido horário e anti-horário de giro, sendo estas apresentadas em 4.4 e 4.5.

$$BaseRateHorario = -0.158993098259366 \times \theta + 0.999843341273359 \quad (4.4)$$

$$BaseRateAntiHorario = 0.158993098259366 \times \theta + 0.999843341273359 \quad (4.5)$$

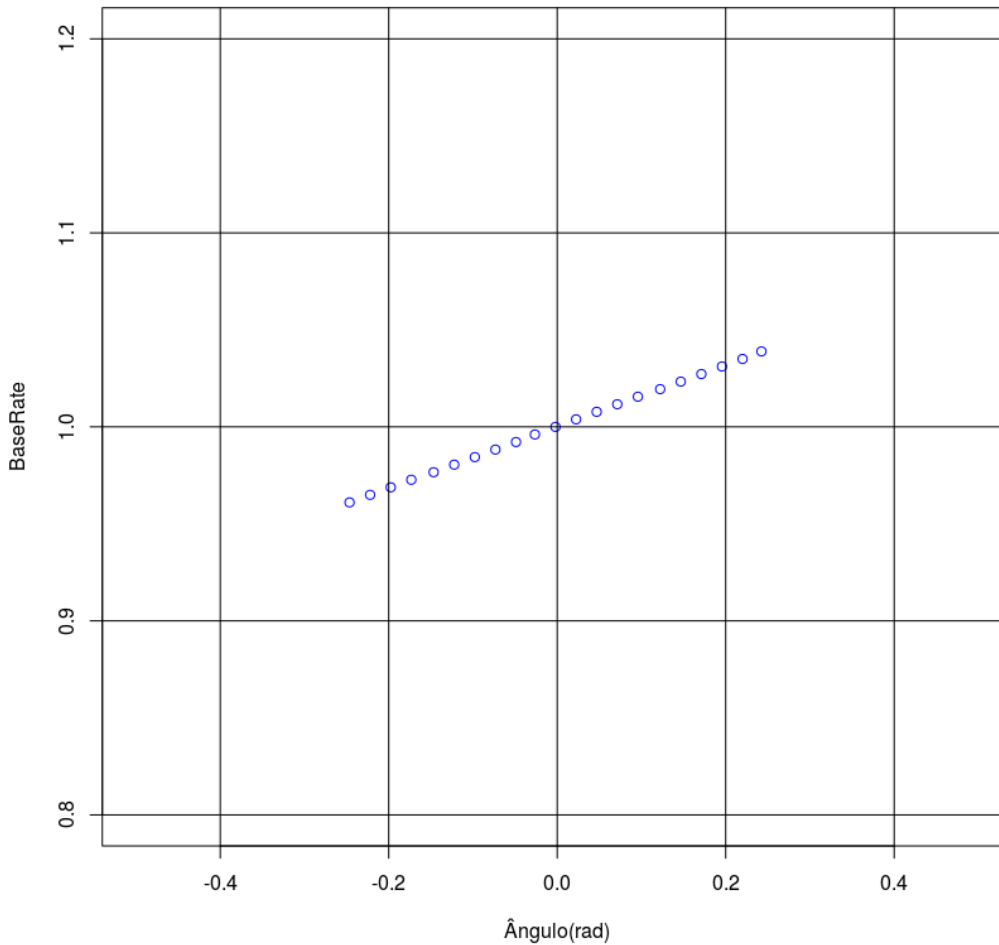


Figura 4.3: Curva característica de deslocamento rotacional - Sentido anti-horário de giro.

4.2 Procedimento de calibração rotacional

Neste método de calibração aqui proposto, a premissa inicial, para que o procedimento de calibração das rodas seja realizado corretamente, é que a relação *BaseRate* esteja o mais próximo possível do seu valor nominal 1, e por isso sugere-se iniciar as rotinas de calibração através da variável *BaselineCalibrado*.

Para possibilitar a medição do ângulo de giro final da base, dois pontos de referência são inseridos na base. Esses pontos devem estar posicionados o mais próximo possível do centro de rotação das rodas e a distância de cada referência ao ponto central da base deve, cuidadosamente, ser avaliada para não interferir nos resultados de calibração. As figuras 4.4 e 4.5 ilustram a base utilizada por este estudo com o devido referenciamento.

Com a base posicionada no ambiente que será realizado o ensaio, duas marcas de referência devem ser desenhadas no solo de teste. Essas marcas serão os pontos básicos de referenciamento e, novamente, devem ser cuidadosamente desenhadas para não interferir na calibração.

A base é então programada para realizar um deslocamento rotacional completo de 360°, sendo que para reduzir os erros provenientes das medições físicas realizadas, sugere-se seguir o mesmo método proposto por [Borenstein and Feng, 1996a], realizando 5 ensaios consecutivos para cada sentido de giro, anotando em cada um o posicionamento final dos dois pontos de referência previamente definidos.

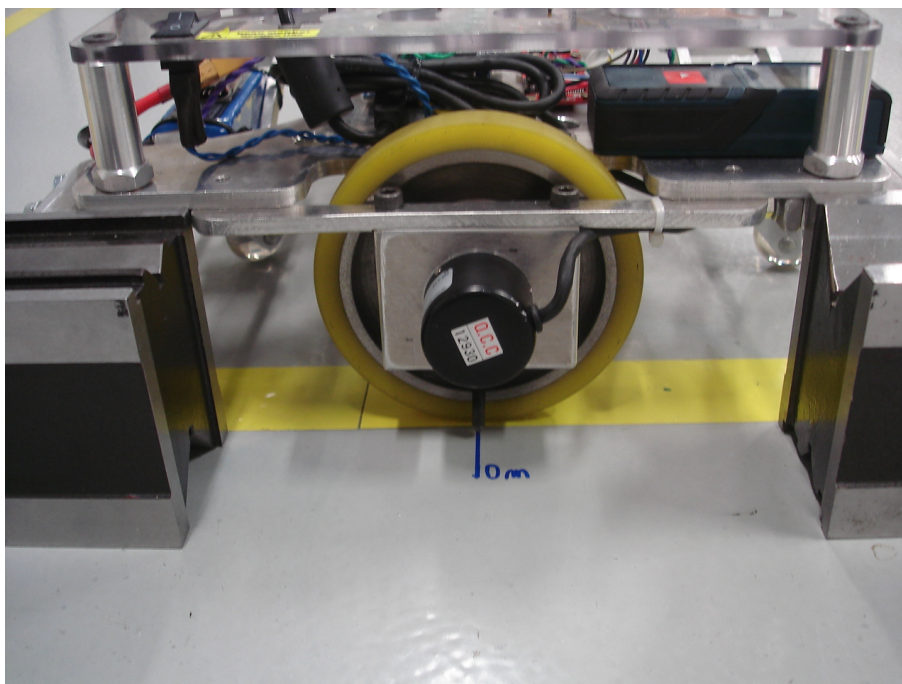


Figura 4.4: Referenciamento da base - Visão geral.

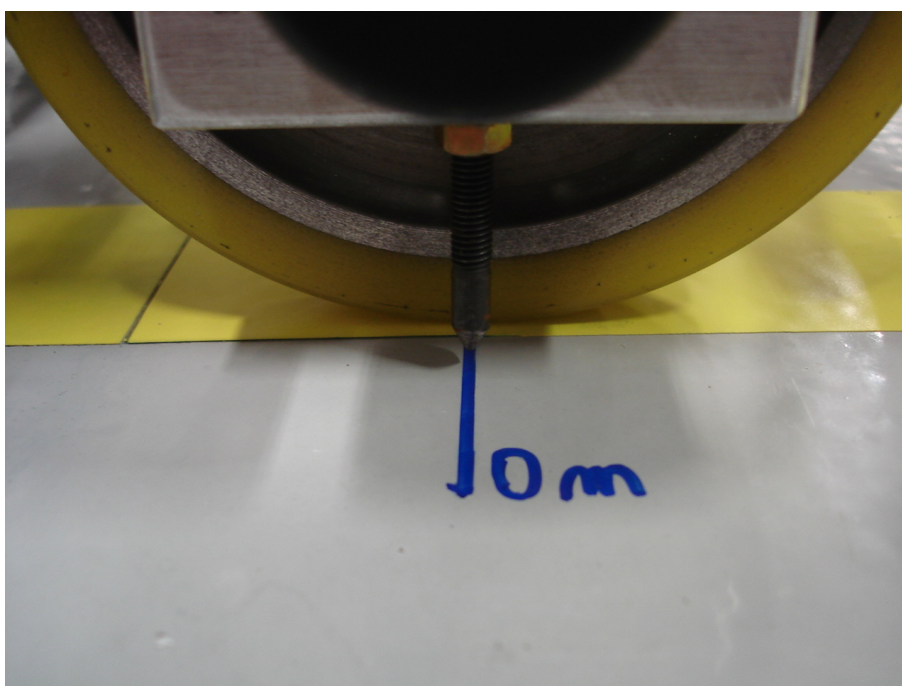


Figura 4.5: Referenciamento da base - Detalhe do posicionamento.

Para definir um valor nas coordenadas X e Y em cada referência demarcada, o ponto médio para cada grupo de dados deve ser calculado seguindo o princípio apresentado em [Borenstein and Feng, 1995] e demonstrado aqui através das equações 2.3 e 2.4. Ao fim da execução um gráfico como o ilustrado na figura 4.6 pode ser gerado para observar o comportamento da base.

Os ângulos para o sentido horário e anti-horário de giro devem então serem calculados utilizando a equação 4.6 e, novamente, como sugerido em [Borenstein and Feng, 1995], e aqui

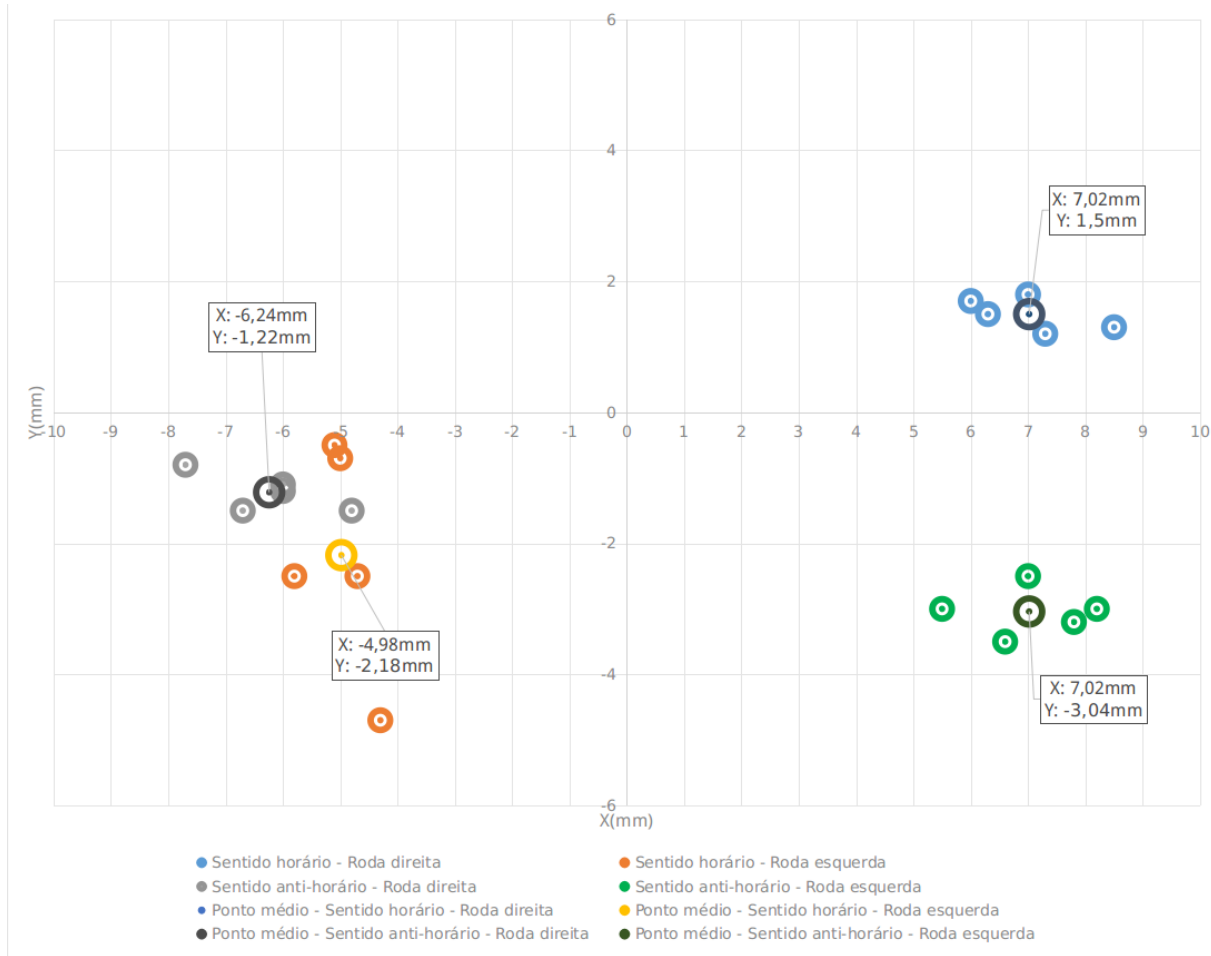


Figura 4.6: Comportamento da base durante o procedimento de calibração do *Baseline*. Os deslocamentos em relação aos eixos X e Y são utilizados para determinar o ângulo θ de parada.

demonstrado através da equação 2.7, o maior ângulo entre as medições deve ser o considerado para a calibração.

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_l - X_r}{Y_l - Y_r}\right) \quad (4.6)$$

Para finalizar a calibração do *Baseline* a equação 4.7 deve ser utilizada, onde multiplica-se o *BaseRate* calculado com o valor nominal da distância *Baseline*, ou como nomeado neste trabalho de pesquisa, pela variável *BaselineCalibrado*.

$$BaselineCalculado = BaselineCalibrado \times BaseRate_{Horario/AntiHorario} \quad (4.7)$$

Estando a base com o valor de *Baseline* o mais próximo possível do valor ideal, é possível então iniciar a rotina de calibração para os diâmetros das rodas. Os princípios e marcações previamente realizadas para a calibração do *Baseline* são aqui novamente utilizados.

A base é programada para realizar um deslocamento rotacional de 180° , sendo que novamente para reduzir os erros provenientes das medições físicas, sugere-se seguir o mesmo método proposto por [Borenstein and Feng, 1995], realizando 5 ensaios consecutivos para cada sentido de giro, anotando em cada um o posicionamento final de uma das referências, calcular a média entre os pontos e utilizar o maior valor calculado como dado de entrada na equação 4.3.

A figura 4.7 ilustra um exemplo de pontos adquiridos durante as medições e o ponto médio calculado para cada sentido de giro. É importante observar que devido a correta configuração da variável *BaselineCalibrado* somente o posicionamento com relação ao eixo *Y* precisa ser medido.

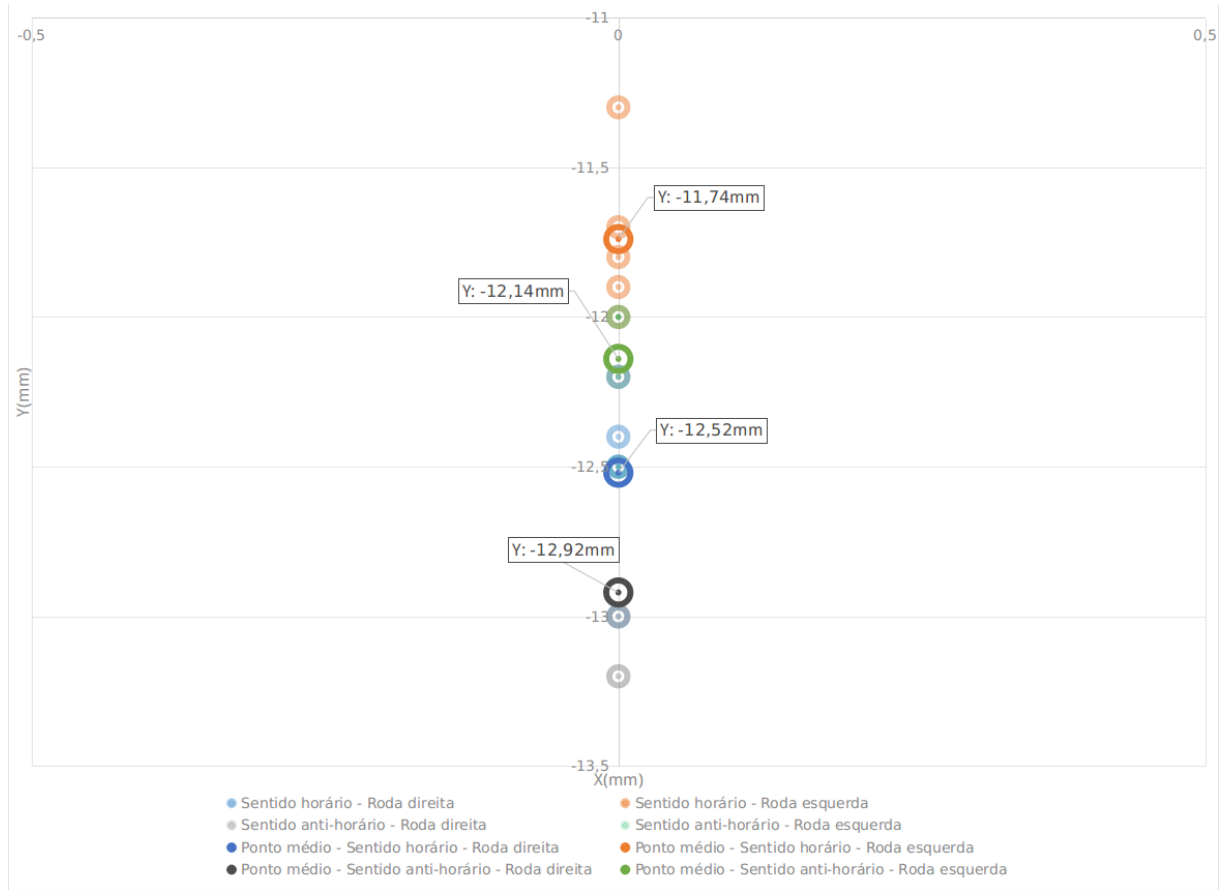


Figura 4.7: Comportamento da base durante a calibração do *WheelRate*. O deslocamento em relação ao eixo *Y* é o utilizado para a correção.

Tendo então calculado o valor da variável *WheelRate* a correção das rodas é feita utilizando as equações 4.8 e 4.9, lembrando que a relação apresentada pela equação 2.23 deve ser respeitada para não alterar os cálculos de deslocamento da base.

$$R_{left\,corrigido} = \frac{2}{WheelRate + 1} \times R_{nominal} \quad (4.8)$$

$$R_{right\,corrigido} = \frac{2}{1/(WheelRate) + 1} \times R_{nominal} \quad (4.9)$$

4.3 Discussão

A principal diferença entre os métodos apresentados no capítulo 2 e o método proposto por este estudo é o espaço físico necessário para executar a calibração. Enquanto que os modelos apresentados no capítulo 2 necessitam de um espaço mínimo de 16m², o método proposto por este estudo limita-se ao tamanho físico da base, o que reduz consideravelmente o espaço físico necessário.

Outro fator reduzido é o tempo necessário para executar o ensaio de calibração. Considerando que quando em movimento de giro a base percorre um trecho referente ao seu perímetro, e nos métodos propostos no capítulo 2 o deslocamento total é de 16m, facilmente percebe-se que o tempo para realizar o ensaio será menor, considerando a velocidade de deslocamento igual para os dois modelos.

Por fim, ainda referindo ao deslocamento necessário para calibrar, como o procedimento necessita de menor deslocamento, menor será a quantidade de erros não-sistemáticos inseridos no sistema, resultado em maior confiabilidade na calibração realizada.

4.4 Considerações

Neste capítulo foram apresentadas as características de uma base robótica que realiza um movimento rotacional e também as equação de calibração para o procedimento proposto por este trabalho de pesquisa.

No próximo capítulo é avaliada a eficiência do método proposto por este estudo, através da comparação de resultados com os métodos apresentados no capítulo 2.

Capítulo 5

Experimentos e resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos métodos de calibração discutidos nos capítulos 2 e 4.

Para todos os métodos de calibração avaliados os parâmetros nominais apresentados pela base foram os utilizados na primeira etapa de calibração, ou seja, $D_{baseline}$ igual a 257mm, R_{left} e R_{right} igual a 120mm. Para cada etapa realizada os valores são ajustados de acordo com os resultados obtidos na calibração anterior.

5.1 Comparação entre os métodos

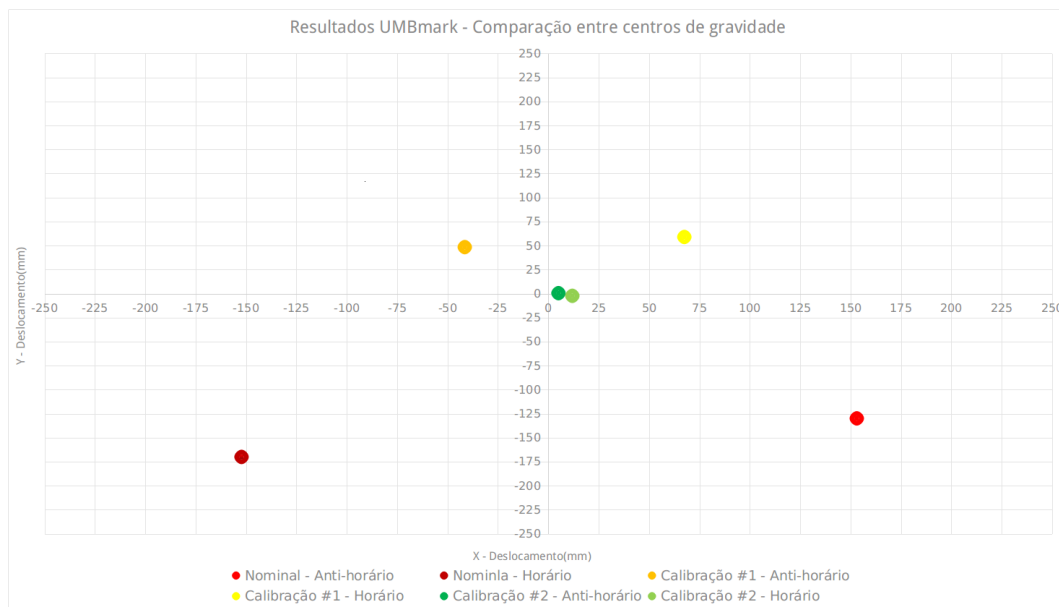


Figura 5.1: Comparação de centros de gravidade para o ensaio *UMBmark*. Com o aumento do número de calibrações o centro de gravidade diminui.

Para seguir a mesma sequência apresentada durante este trabalho de pesquisa, o primeiro método avaliado foi o *UMBmark*. Conforme recomendado em [Borenstein and Feng, 1995] o centro de gravidade para cada grupo de medições é apresentado em um gráfico *XY* padrão, onde é possível observar individualmente a eficiência da calibração realizada, conforme ilustrado na figura 5.1.

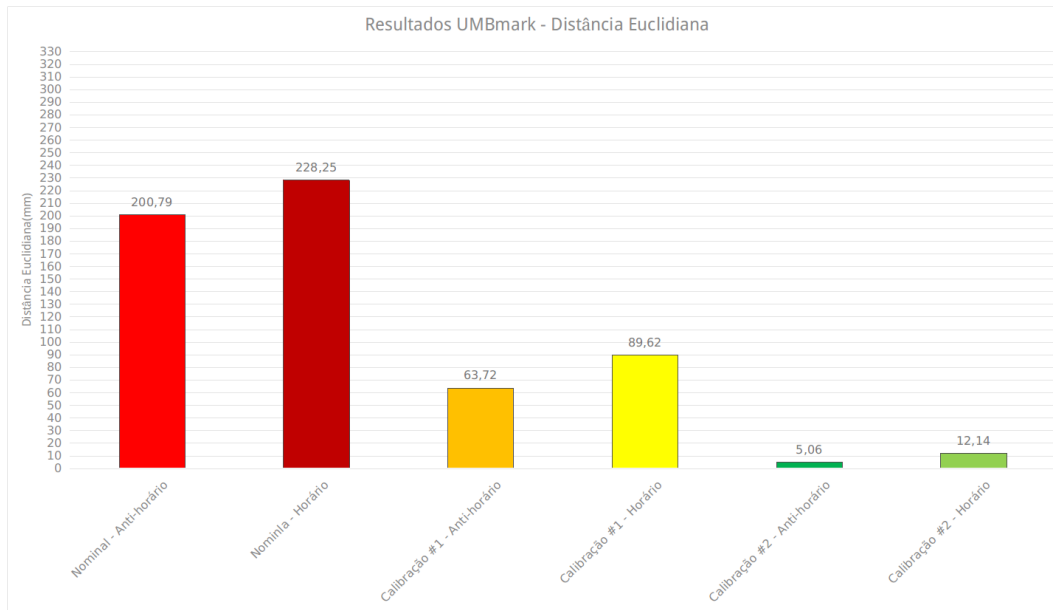


Figura 5.2: Comparação de distâncias *euclidiana* para o ensaio *UMBmark*. Com o aumento de número de calibrações, o erro de posicionamento final da base diminui.

Avaliando as distâncias *euclidianas* apresentadas por cada centro de gravidade calculado, observa-se o aumento de desempenho da base após cada calibração realizada, sendo essa ilustrada na figura 5.2.

A maior distância *euclidiana* observada para a condição nominal é a do sentido horário, cujo valor é 228,25mm. Comparando com a maior distância obtida após uma etapa de calibração, cujo valor é 89,62mm, obtém-se uma redução de aproximadamente 60% do erro inicial apresentado pela base.

Repetindo novamente o procedimento de calibração utilizando os parâmetros já calculados na *Calibração 1*, obtém-se novamente uma redução da distância, cujo valor é 12,14mm, ou seja, depois de duas etapas de calibração o erro da base foi reduzido em aproximadamente 95%.

Com isso conclui-se que o método *UMBmark* melhora o desempenho da base com o aumento do número de etapas de calibração, sendo que o número máximo de calibrações a serem realizadas é um item a ser pesquisado, mas que não está no escopo deste trabalho de pesquisa.

Para o modelo de calibração com erros adjuntos novamente os resultados são apresentados em um gráfico XY padrão como forma visual de avaliação, sendo ilustrado na figura 5.3. O aumento de desempenho da base novamente pode ser calculado através da avaliação das distâncias *euclidianas*, ilustradas na figura 5.4. A maior distância *euclidiana* observada inicialmente foi no sentido horário, cujo valor é 310,17mm, sendo que após uma rotina de calibração a maior distância calculada foi de 34,59mm, o que representa uma melhora de 89% já na primeira etapa de calibração. Realizando uma segunda rotina, a maior distância observada é 10,50mm para o sentido anti-horário, representando assim uma redução de aproximadamente 97% do erro inicial observado.

Para comparar o método de calibração proposto por este estudo com os apresentados no capítulo 2, o mesmo procedimento de validação proposto em [Borenstein and Feng, 1996a] foi utilizado, depois da base ser calibrada com o procedimento rotacional. A figura 5.5 ilustra o posicionamento final dos centros de gravidade calculados para cada ensaio realizado e a figura 5.6 a distância *euclidiana*.

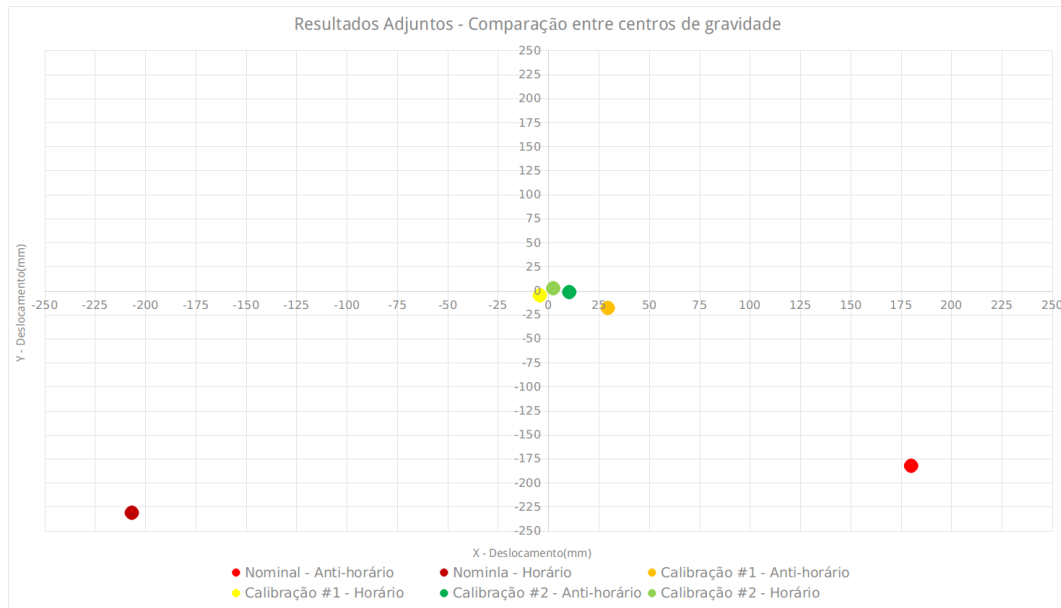


Figura 5.3: Comparação entre centros de gravidade para erros adjuntos. Assim como no modelo *UMBmark* o centro de gravidade diminui, mas aqui de forma mais rápida como observado já na primeira calibração.

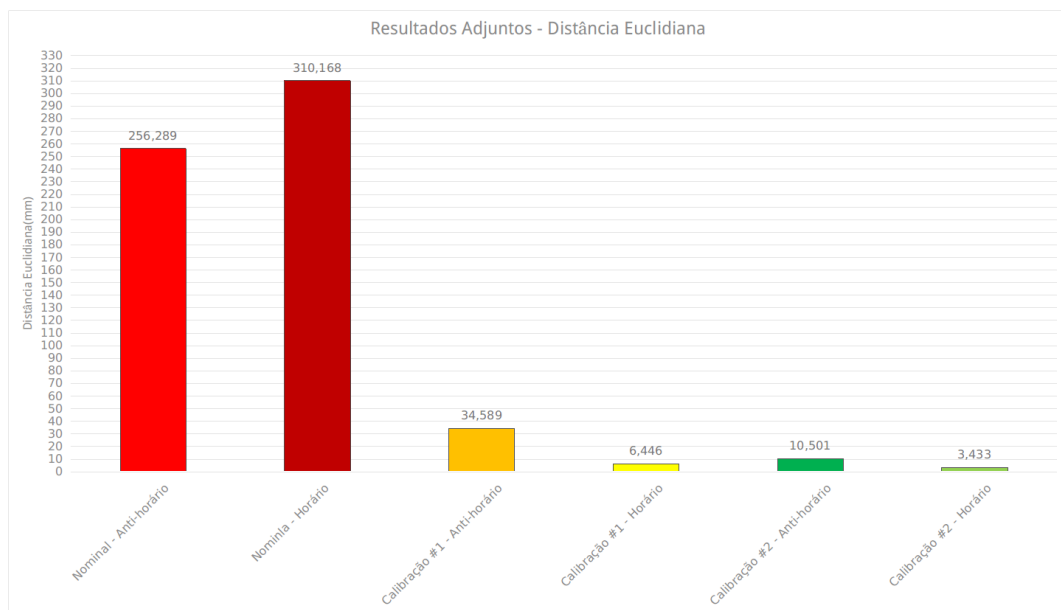


Figura 5.4: Comparação entre distâncias *euclidiana* para o método dos erros adjuntos. Novamente a diminuição do erro de posicionamento da base, mas com ganho mais elevado já na primeira calibração.

A maior distância *euclidiana* observada na condição nominal foi no sentido horário de giro, cujo valor é 285,25mm, e após a primeira rotina de calibração o maior valor foi para o sentido anti-horário com um valor de 23,44mm, representando um aumento de desempenho de 92% na primeira rotina de calibração. Realizando uma segunda rotina o maior erro volta a ser observado no sentido horário, cujo valor é de 26,92mm e representa uma melhora de 91% para o maior erro observado, sendo possível concluir que o método proposto por este estudo apresenta uma tendência corretiva semelhante a dos métodos previamente apresentados.

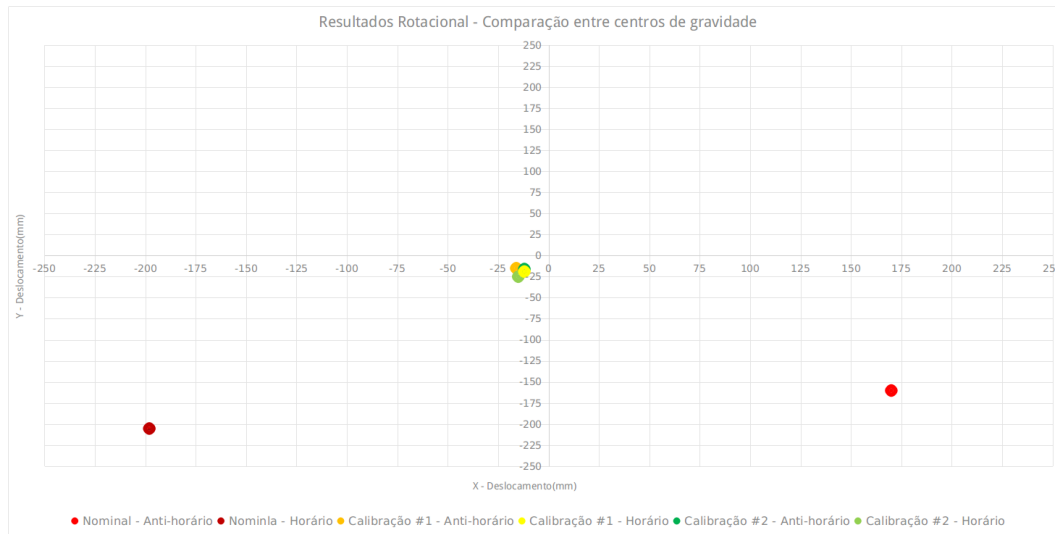


Figura 5.5: Comparação entre centros de gravidade para calibração rotacional. Neste modelo também é observado a redução do centro de gravidade, mas com pouco diferença entre as calibrações.

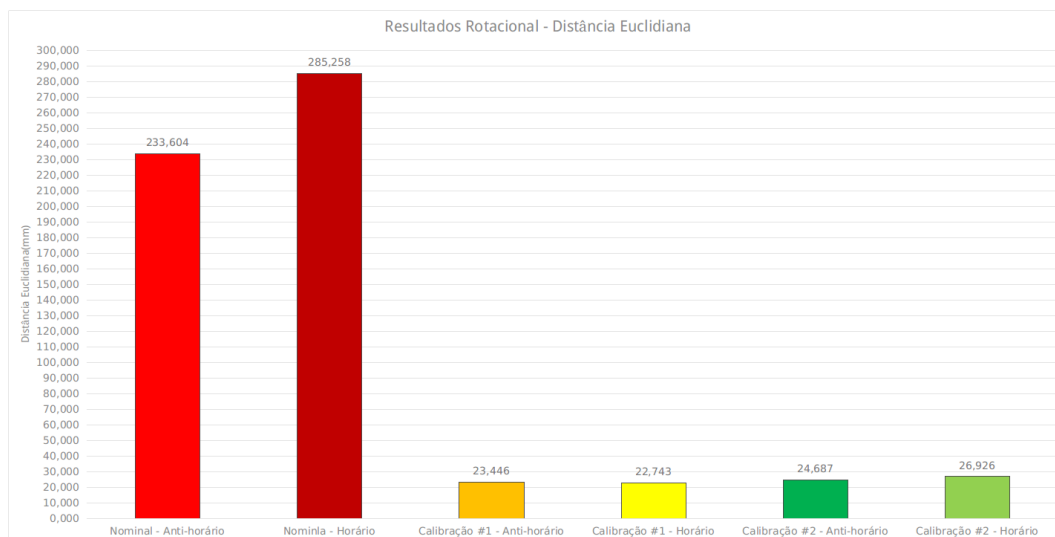


Figura 5.6: Comparação entre distâncias *euclidiana* para o método rotacional. A distância diminui pouco quando comparado as diferentes calibrações.

5.2 Discussão

Comparando os resultados é possível observar que ambos apresentam uma tendência corretiva eficiente, que é o esperado para um procedimento de calibração, mas com níveis de melhora variáveis para cada etapa realizada. Para exemplificar tal afirmação uma comparação direta entre os resultados da redução do erro se faz necessária e esta comparação é realizada na tabela 5.1.

Enquanto que o método *UMBmark* reduziu em 60% o erro da base na primeira calibração, o método dos erros adjuntos alcançou 89% de melhora também na primeira calibração, representando 29% de diferença entre os métodos. Sendo assim, se a velocidade de calibração for um fator fundamental para o processo, o método dos erros adjuntos é mais eficiente que o *UMBmark*. Tratando da qualidade dos resultados, observa-se que ao final de duas rotinas de

calibração a diferença apresentada é de somente 2% , resultando em um desempenho similar entre os métodos apresentados.

O método proposto por este estudo apresenta uma característica que o diferencia dos demais métodos, pois não é observado aumento de desempenho com o incremento do número de calibrações realizadas, conforme demonstra a tabela 5.1. No entanto essa característica só é observada devido a baixa precisão do modelo de medição utilizado, pois quanto menor for o erro apresentado, menor será o deslocamento e, por consequência, mais difícil de medir manualmente o posicionamento da base.

Com referência a qualidade da calibração realizada o modelo aproxima-se dos demais, ficando o maior incremento novamente limitado a qualidade das medições realizadas.

Tabela 5.1: Resultados da calibração para cada método utilizado

Método	Percentual de redução do erro	
	Calibração #1	Calibração #2
UMBmark	60%	95%
Erros adjuntos	89%	97%
Rotacional	92%	91%

5.3 Considerações

Neste capítulo o modelo de calibração proposto por este estudo foi comparado com outros dois modelos, através de uma rotina de validação para bases robóticas. Uma comparação direta entre os resultados também foi apresentada, onde observa-se o ganho de desempenho quando utilizado o modelo rotacional. Este ganho de desempenho é observado também no tempo necessário para a calibração, pois como o espaço percorrido pela base é menor, o tempo para executar o ensaio diminui.

No próximo capítulo as considerações finais são apresentadas e também as possibilidades de expandir o trabalho desenvolvido.

Capítulo 6

Conclusão

Com este trabalho de pesquisa é possível concluir que o modelo de calibração proposto contribui para o sistema de odometria, como é observado através do ganho de desempenho apresentado pela base após calibração pelo modelo rotacional, mas que, no entanto, é muito dependente da capacidade de medir o posicionamento final da base após a execução do ensaio, visto o não aumento de desempenho com o incremento do número de calibrações.

Por outro lado, uma vez que seja possível melhorar a qualidade das medições, a tendência corretiva do modelo é 100% de precisão, já que as equações foram extraídas do comportamento mecânico real apresentado pela base, possibilitando incrementar o nível de calibração robótico para a auto-calibração. Neste contexto, a base poderia ser equipada com um sistema de visão computacional capaz de focalizar o chão onde o robô trafega, e um modelo visual de referenciamento posicionado abaixo do robô a ser calibrado. Nestas condições, as rotinas de calibração são programadas na base, sendo que em cada execução o sistema de visão mede o posicionamento fazendo uso do padrão visual e ao fim das execuções as variáveis de odometria são automaticamente alteradas com os novos valores calculados.

Um dos objetivos específicos deste estudo, foi desenvolver uma base robótica com sistema de odometria possibilitando alterações físicas e de software no sistema, para avaliar o comportamento em diferentes configurações. Apesar de não ser o foco principal deste estudo, com essas possibilidades de alteração, essa pesquisa também apresenta uma segunda contribuição a área acadêmica, estando essa relacionada aos métodos de controle que melhor se adaptam ao modelo direção diferencial. Como apresentado no capítulo 3, a utilização de um método de controle eficiente diminui os erros inseridos no sistema, que por consequência melhora a calibração realizada.

Ao fim espera-se que o modelo de calibração contribua para o aumento de desempenho em robôs móveis, nas tarefas de mapeamento e localização, aumentando a velocidade de calibração e reduzindo os erros durante o processo.

Referências Bibliográficas

- [Arduino, 2016] Arduino (2016). Arduino mega 2560. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. Acessado em 26/05/2016.
- [Borenstein and Feng, 1995] Borenstein, J. and Feng, L. (1995). Umbmark: A benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots. In *SPIE Conference on Mobile Robots*, pages 1–12, Philadelphia - USA.
- [Borenstein and Feng, 1996a] Borenstein, J. and Feng, L. (1996a). Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(6):869–880.
- [Borenstein and Feng, 1996b] Borenstein, J. and Feng, L. (1996b). *Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques*. A. K. Peters LTDA.
- [Braga, 2009] Braga, N. C. (2009). Como funcionam os encoders. *Mecatrônica Fácil*, 5(50):16–19.
- [Instruments, 2016] Instruments, N. (2016). Explicando a teoria pid. <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>. Acessado em 27/05/2016.
- [Jung and Chung, 2012] Jung, C. and Chung, W. (2012). Accurate calibration of two wheel differential mobile robots by using experimental heading erros. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minnesota - USA.
- [Robótica, 2016] Robótica, U. (2016). Aprenda robótica com o robô uno. <http://www.unorobotica.com.br/>. Acessado em 22/06/2016.
- [Secchi, 2008] Secchi, H. (2008). *Uma introdução aos robôs móveis*. NERA.
- [Siegwart and Nourbakhsh, 2004] Siegwart, R. and Nourbakhsh, I. R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press.

Apêndice A

Dedução da odometria robótica

Este apêndice apresenta as deduções das equações para o cálculo de odometria. Para iniciar o processo de dedução parte-se do pressuposto que uma base robótica apresenta uma visível diferença de diâmetro entre as rodas. Essa diferença é calculada através da equação A.1, onde R_{left} e R_{right} representam os diâmetros teóricos das rodas esquerda e direita, respectivamente.

$$Da = \frac{R_{left}}{R_{right}} \quad (A.1)$$

Para qualquer movimento realizado pela base é necessário calcular o deslocamento gerado por cada roda e esse deslocamento é calculado através da relação do número de pulsos do encoder pelo diâmetro da roda. Nas equações A.2 e A.3 $pulses$ representa a contagem de pulsos do encoder e $resolution$ a quantidade de pulsos fornecidos em uma volta do encoder.

$$D_{left} = \pi \times R_{left} \times \frac{pulses}{resolution} \quad (A.2)$$

$$D_{right} = \pi \times R_{right} \times \frac{pulses}{resolution} \quad (A.3)$$

Para todos os cálculos deduzidos neste apêndice a representação de deslocamento ilustrado na figura A.1 é utilizada, onde é observado o comportamento apresentado pela base quando existe a diferença de diâmetro entre as rodas.

Inicialmente deduz-se a equação para determinar a trajetória real realizada pela base robótica durante a execução de um movimento linear. A figura A.1 ilustra que o deslocamento real apresentado pela base robótica é uma média entre o deslocamento total apresentado por cada roda da base, sendo esse valor expresso na equação por D_{center} .

$$D_{center} = \frac{D_{left} + D_{right}}{2} \quad (A.4)$$

Ao finalizar o deslocamento as rodas realizam uma trajetória, formando um raio de giro. Esse raio representa o quanto a base girou desde o início do deslocamento e é expresso nas equações A.5 e A.6 por θ .

Partindo da trigonometria básica:

$$\theta \times R_{left} = D_{left} \quad (A.5)$$

$$\theta \times R_{right} = D_{right} \quad (A.6)$$

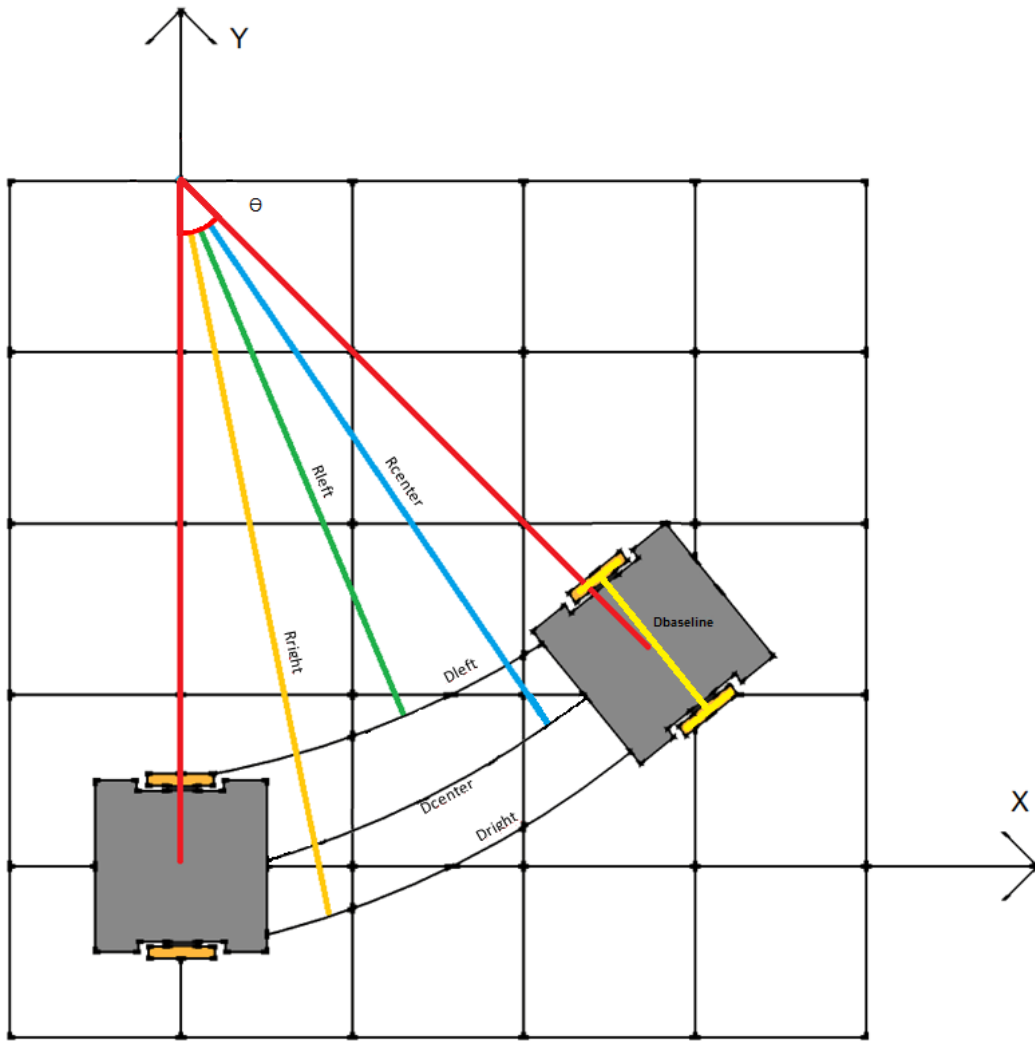


Figura A.1: Deslocamento de uma base robótica em trajetória circular

Considerando o valor de $D_{baseline}$:

$$R_{left} + D_{baseline} = R_{right} \quad (A.7)$$

Subtraindo A.5 de A.6:

$$\theta \times (R_{right} - R_{left}) = D_{right} - D_{left} \quad (A.8)$$

$$\theta \times (D_{baseline}) = D_{right} - D_{left} \quad (A.9)$$

$$\theta = \frac{D_{right} - D_{left}}{D_{baseline}} \quad (A.10)$$

Para o cálculo da posição relativa no plano cartesiano se faz uma aproximação linear da curvatura apresentada pela trajetória D_{center} . Essa aproximação é possível por acreditar que os erros sistemáticos apresentados pela base sejam suficientemente pequenos ao ponto de limitar o arco gerado durante o deslocamento. Com essa aproximação os cálculos são simplificados, pois

somente se faz necessário o uso de geometria básica para a determinação da posição cartesiana, conforme apresentado pelas equações A.11 e A.12.

$$X = X + D_{center} \times \cos(\theta) \quad (\text{A.11})$$

$$Y = Y + D_{center} \times \sin(\theta) \quad (\text{A.12})$$

A tabela A.1 resume os cálculos realizados pelo sistema de odometria.

Tabela A.1: Resumo das equações de odometria.

Deslocamento total	$D_{center} = \frac{D_{left} + D_{right}}{2}$
Ângulo de giro instantâneo	$\Theta = \frac{D_{right} - D_{left}}{D_{baseline}}$
Ângulo de giro acumulado	$\theta = \theta + \Theta$
Posição cartesiana X	$X = X + D_{center} \times \cos(\theta)$
Posição cartesiana Y	$Y = Y + D_{center} \times \sin(\theta)$

Apêndice B

Características mecânicas da base desenvolvida

Este apêndice apresenta as características mecânicas principais apresentadas pela base robótica desenvolvida para este estudo. Muitas das informações apresentadas na tabela B.1 foram retiradas diretamente das folhas de dados dos componentes e, portanto, para maiores informações as mesmas devem ser consultadas.

Tabela B.1: Características construtivas da base robótica

Características mecânicas		
Comprimento		300 mm
Largura		300 mm
Altura		120 mm
Peso		10 kg
Motores		
Modelo		Pittman GM9X14
Tensão de alimentação		12Vcc
Corrente sem carga		0,29A
Corrente de pico		10,9A
Sistema de redução		
Redução		218.4:1
Velocidade máxima no eixo da caixa de redução		35,1rpm
Torque no eixo da caixa de redução		6,07Nm
Roda		
Diâmetro		120±0,1mm
Largura		10±0,5mm
Encoder		
Modelo		HTR-3A-360A-H
Fases de saída		ABZ
Tensão de alimentação		5 - 26Vcc
Pulsos por revolução		360ppr
Sistema de controle		
Controlador		Arduino Mega 2560
Drive dos motores		VNH2SP30
Características elétricas		
Potência nominal		6,96W
Potência máxima		261,6W
Duração da bateria (potência nominal)		7h35min
Duração da bateria (potência máxima)		12min
Materiais		
Base inferior		Alumínio 2218 - 10mm
Suporte dos motores e das rodas		
Suporte das rodas de apoio		
Suporte dos encoders		
Base superior		Polícarbonato cristal - 6mm
Rodas		Ferro fundido com revestimento de PU

Apêndice C

Cálculos mecânicos de uma base modelo *direção diferencial*

Este apêndice apresenta as equações deduzidas para o modelo de base robótica desenvolvida por este estudo, onde é considerado duas rodas paralelas atuando com encoders acoplados diretamente aos eixos dos motores, com diâmetro fixo das rodas e distância entre as rodas também fixa.

C.1 Movimentos lineares

C.1.1 Graus por pulsos

Definição da quantidade de graus por pulsos relativos ao encoder utilizado, onde ppr representa a quantidade de pulsos fornecidos por uma volta do encoder.

$$mdppr = \frac{360}{ppr} \quad (C.1)$$

C.1.2 Relação entre polias

Relação entre polias do motor e do encoder para os casos onde o encoder não é acoplado ao eixo do motor. A variável $mdiapm$ representa o diâmetro da polia do motor e $mdiape$ representa o diâmetro da polia do encoder.

$$mrelat = \frac{mdiapm}{mdiape} \quad (C.2)$$

C.1.3 Graus por pulsos corrigido

Correção da quantidade de graus por pulso aplicando a relação entre as polias.

$$mcdpp = mdppr \times mrelat \quad (C.3)$$

C.1.4 Pulsos por revolução corrigido

Correção da quantidade de pulsos por revolução do encoder.

$$mcppr = ppr \times mrelat \quad (C.4)$$

C.1.5 Deslocamento em uma volta da roda

Deslocamento por volta da roda onde $mdiaw$ representa o diâmetro físico nominal da roda, conforme ilustrado na figura C.1.

$$mdispv = \pi \times mdiaw \quad (C.5)$$

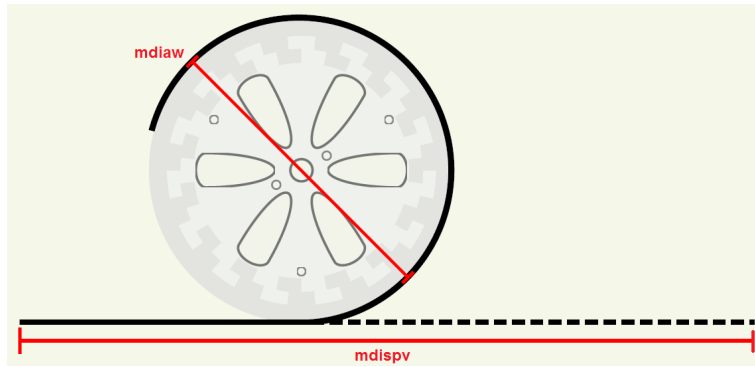


Figura C.1: Representação do deslocamento em uma volta da roda. Adaptado de [Robótica, 2016].

C.1.6 Deslocamento por pulso do encoder

Deslocamento resultante quando um pulso unitário do encoder é gerado, conforme ilustrado na figura C.2.

$$mdispp = \frac{mdispv}{mcppr} \quad (C.6)$$

C.2 Movimentos rotacionais

C.2.1 Perímetro da base

Perímetro da circunferência gerada pela distância das rodas da base onde $Dbaseline$ representa a distância entre as rodas.

$$mperim = \pi \times Dbaseline \quad (C.7)$$

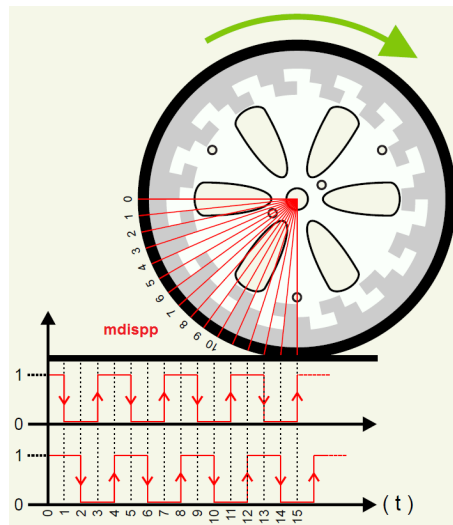


Figura C.2: Representação do deslocamento por pulso do encoder. Adaptado de [Robótica, 2016].

C.2.2 Deslocamento rotacional por pulso do encoder

Quantidade de graus deslocados por cada pulso do encoder, conforme ilustrado na figura C.3.

$$mdispr = \frac{360 \times mdispp}{mperim} \quad (C.8)$$

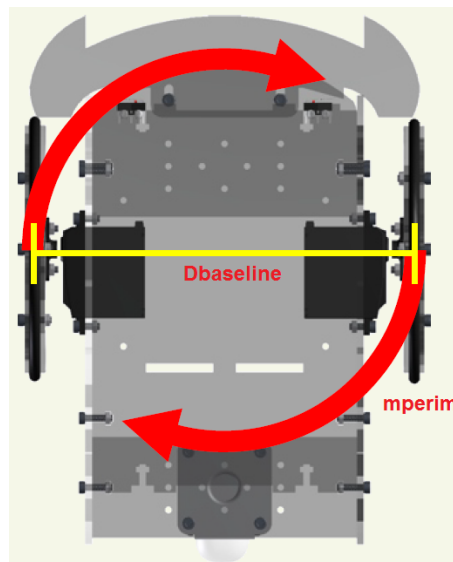


Figura C.3: Representação do perímetro da base. Adaptado de [Robótica, 2016].